INVESTIGACION y CIENCIA

LA CIENCIA AL SERVICIO DE LA JUSTICIA

¿A QUE LLAMAMOS NEUTRINOS MUTANTES?

LEONARDO TORRES QUEVEDO

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN



¿HACIA DONDE VA EL TRANSPORTE?

JULIO 1990
500 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa



Julio de 1990 Número 166

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Tomás López-Fragoso Alvarez: *La ciencia al servicio de la justicia*; Ramón Pascual: *El problema de los neutrinos solares*; Santiago Torres: *Inmunoterapia del cáncer*; Elisa Villa: Archaeopteryx; Luis Bou: *¿Hacia dónde va el transporte?*, *Juegos matemáticos* y *Juegos de ordenador*; Joan Domènec Ros: *La freza del capelán*; Donato Franco: *Paracaídas de altas prestaciones*.

Ciencia y sociedad:

José M. Martín Senovilla, Josep-Enric Llebot

Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver

Libros:

Luis Alonso, Javier de Lorenzo, Susana García López y Angel Romo

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
7	Stephen Ferry, Gamma-Liaison
8	Neil O. Hardy
10-11	Peter J. Neufeld
12	Johnny Johnson
17	Soviet-American Gallium Experiment
18-22	Andrew Christie
23	Edward Bell
27	Richard Knazek
28	Carol Donner
29	Steven A. Rosenberg
30	Johnny Johnson
31	Carol Donner
32	Steven A. Rosenberg
33	Carol Donner
43	Peter Wellnhofer
44	Patricia J. Wynne
45-47	Peter Wellnhofer
48	Patricia J. Wynne
49	Renate Liebreich, Colección estatal de Baviera sobre Paleontología y Geología Histórica
54-55	Cía. Ford Motor, Cía. Nissan Motor, Ltd., y Renault USA
56-63	G. Retseck y E. Bell (*arriba*)
56-57	Edward Bell y Cadillac Motor Car Div., Buick Motor Div., Volkswagen de América, Inc. Chevrolet Motor Div. y Chrysler Corp.
58	General Motors Corporation (*centro*), S. C. Bates, Lab. de Investigación GM (*abajo*)
60	George Retseck (*abajo*)
62-63	© Inst. Artes de Detroit, Fundadores de la Sociedad de Compras, Fondo de Edsel B. Ford y obsequio de Edsel B. Ford
65	Steven Homer/First Light
66-67	Steven Homer/First Light (*arriba*), Tom Prentiss (*abajo*)
68	Tom Prentiss
69	Edward Bell
73	Laboratorios Nacionales Sandia
74-75	Hank Iken
76	Laboratorios Nacionales Sandia
78	Hank Iken
80-87	Francisco González de Posada
88	Declan Haun (*izquierda*), Michael F. Barnsley y L. Reuter (*derecha*)
89	Russell Ruthen
90	Andrew Christie
91	Edward Bell (*izquierda*), Michael F. Barnsley y L. Reuter (*derecha*)
93-98	PLS, P. Horber



LA PORTADA muestra el tablero de instrumentos que espera a los automovilistas "a la vuelta de la esquina". La pantalla de vídeo permite al conductor localizar sobre un mapa la ubicación de su vehículo. ¿Desea telefonear? Pulse un botón y aparecerá un teclado. ¿Necesita alojamiento? La pantalla le mostrará dónde mirar, le indicará las tarifas y telefoneará para que pueda hacer la reserva. Es incluso un ordenador personal. Tales sistemas electrónicos prometen una conducción más satisfactoria, amén de más segura (véase "¿Hacia dónde va el transporte?", por Karen Wright, en este mismo número).

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal Garfella
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48   Telefax 419 47 82

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Armand Schwab, Jr., *Managing Editor*; Timothy Appenzeller, Laurie Burnham, *Associate Editors*; Timothy M. Beardsley; Elizabeth Corcoran; John Horgan; June Kinoshita; Philip Morrison, *Book Editor*; John Rennie; Philip E. Ros; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen, Paul Wallich; Karen Wright
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.
ADVERTISING DIRECTOR Robert F. Gregory
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Georg-Dieter von Holtzbrinck
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª
08029 Barcelona (España)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	5500	10.000
Extranjero	6200	11.500

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 500 pesetas
Extraordinario: 650 pesetas

- Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.
- En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.
- El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. 652 42 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

PUBLICIDAD

Madrid: Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 409 70 45 - Fax 409 70 46

Cataluña: Marcel Klein
M. K. Publicidad
Ortigosa, 14-16, 3º, D. 20
08003 Barcelona
Tel. 302 45 05 - Fax 412 52 75

ISSN 0210-136X   Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por T2, Llull, 145 - 08018 Barcelona
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de la Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

La ciencia al servicio de la justicia

En los tribunales, los testimonios forenses pasan normalmente sin ser discutidos por una comunidad jurídica que no posee conocimientos técnicos. ¿Cómo debe valorar el juez las pruebas aportadas por la ciencia?

Peter J. Neufeld y Neville Colman

En las primeras horas de la tarde del 21 de noviembre de 1974, unas potentes bombas arrasaron dos bares de la ciudad industrial de Birmingham, Inglaterra, dejando un saldo de 21 muertos y 162 heridos. Inmediatamente, el Gobierno atribuyó los atentados al IRA, ordenando una movilización general en busca de los responsables. Después de que un ferroviario informara que seis irlandeses habían tomado el tren en Birmingham minutos después de la explosión de la primera bomba, la policía los interceptó cuando desembarcaban en la estación de Heysham. Los seis fueron conducidos a la comisaría, donde sometieron sus manos a unos análisis clínicos, que revelaron la presencia de algunos nitritos que debían estar causados por la reciente manipulación de explosivos. El científico-forense que ejecutó este procedimiento, conocido como el test de Greiss, informó de "hallazgos positivos" en las manos derechas de dos de los seis sospechosos. Esta prueba se convertiría en el eje de la acusación pública contra "los seis de Birmingham".

Ahora, 16 años después, los seis hombres podrían ser liberados. Se ha demostrado que el test de Greiss, sobre el cual se basó decisivamente la convicción, no es fiable. Múltiples objetos de uso común, verbigracia, barajas viejas, cajetillas de cigarrillos, lacas y aerosoles, a la vez que los explosivos, dan un resultado positivo en el test. Lo cierto es que los seis habían pasado la mayoría del trayecto hacia Heysham jugando a la baraja y fumando cigarrillos.

El caso Birmingham levanta fuertes controversias sobre la aplicación de la tecnología forense en las investigaciones criminales. Desde el descubrimiento de la dactiloscopia a principios de siglo, la ciencia ha visto incrementada su poderosa participación en la administración de justicia. En efecto, el testimonio científico constituye a menudo el factor decisivo para la resolución judicial de causas civiles y criminales. El análisis científico de huellas dactilares, sangre, semen, jirones de vestidos, pelos, armas, huellas de neumáticos y otras pruebas físicas dejadas en la escena de un crimen pueden ser más convincentes para un jurado que la declaración de un testigo ocular. Como manifestó el miembro de un jurado después de un proceso en el distrito neoyorquino de Queens: "no se puede discutir con la ciencia".

Los científicos suelen recibir bien esta opinión. Dado que la comunidad científica vigila la investigación, sometiendo las nuevas teorías y descubrimientos a exhaustivas revisiones y a verificaciones independientes, se acepta normalmente esta misma opinión cuando la ciencia se aplica para la determinación de hechos en un proceso judicial. Pero tales controles están ausentes en los tribunales. En su lugar, personas ajenas al campo de la ciencia –fiscales, abogados, jueces y jurados– son llamados a evaluar críticamente la competencia de un perito. Con frecuencia, los fiscales y abogados ignoran los posibles fallos de un método o argumento científico, y éste se convierte en indiscutible. En otras ocasiones, los adversarios en un caso presentarán opuestas opiniones de expertos, dejando en manos de un jurado compuesto por personas legas en la materia el tener que decidir el fundamento de los argumentos científicos.

La disparidad existente entre los criterios de prueba científicos y los judiciales ha permitido el uso prematuro, o sin comprobación por otros expertos, de nuevos métodos forenses en juicios criminales. El problema ha adquirido mayor trascendencia con la aparición de la investigación forense de la tipificación del ADN, técnica reciente que, en teoría, permite identificar a un individuo por su ADN con un alto grado de certeza. No obstante, muchos aspectos de la investigación forense por ADN no han recibido un examen adecuado por parte de la comunidad científica, lo que no ha impedido que policía y fiscales hayan realizado análisis en más de 1000 investigaciones criminales en los Estados Unidos desde 1987. Pocos de estos casos llegaron a juicio. En la mayoría de ocasiones, los acusados se confesaron culpables después de que el test del ADN, presumiblemente infalible, fuera positivo.

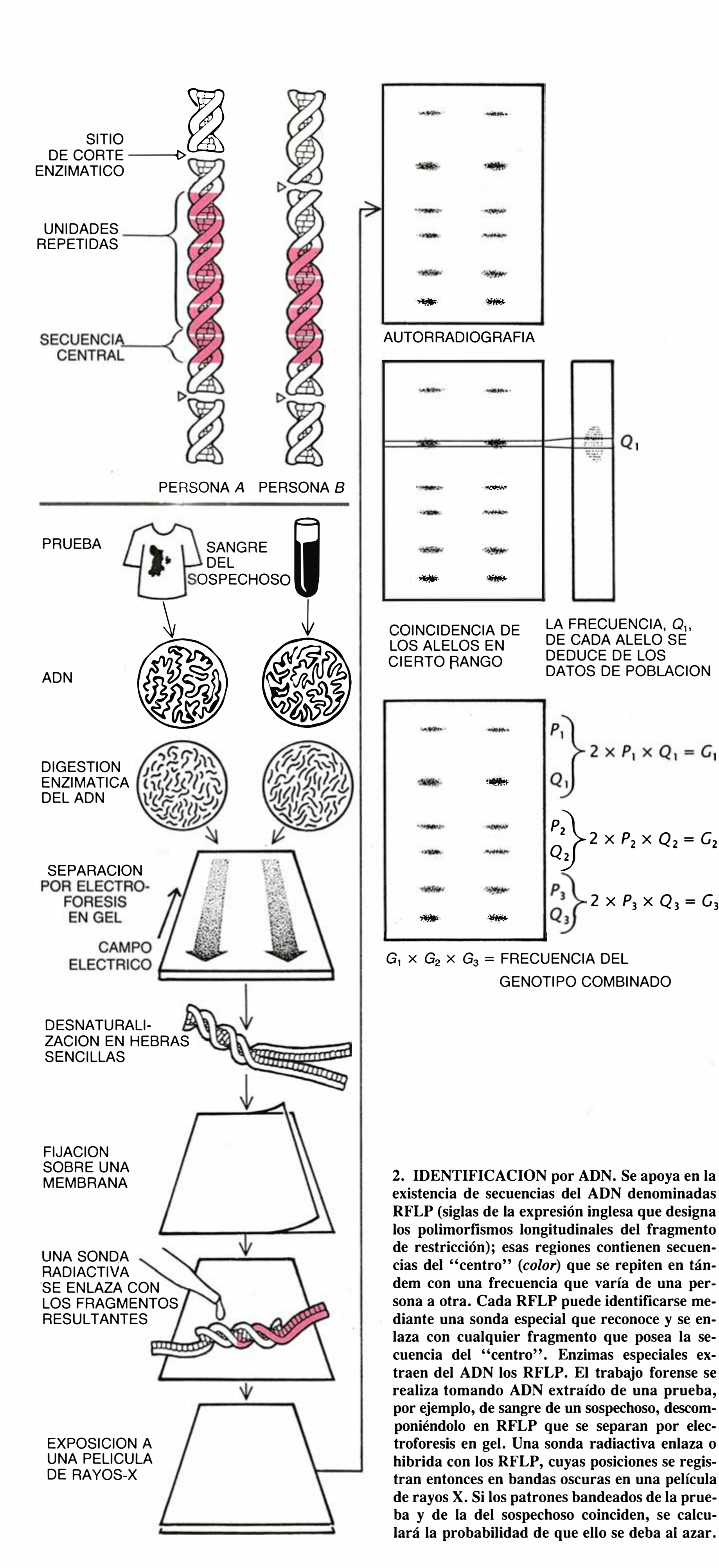
Varios casos recientes han levantado serias dudas sobre las demandas basadas en la prueba del ADN. El ve-

PETER J. NEUFELD y NEVILLE COLMAN han colaborado durante varios años en el problema de la admisión de nuevas técnicas científicas en los casos criminales y han informado tanto a abogados defensores como a acusadores. Neufeld, un abogado especializado en defensa criminal y en procesos sobre derechos civiles, fue uno de los abogados del caso el *Pueblo v. Castro*, en el cual la prueba del ADN fue contradicha con éxito por primera vez. Es miembro del grupo gubernamental de expertos en análisis forense del ADN del estado de Nueva York. Neufeld obtuvo el doctorado en derecho en 1975 por la Universidad de Nueva York y es profesor en la de Fordham. Colman es director del centro de laboratorios clínicos del Hospital Monte de Sinaí en Nueva York. Se formó en la Universidad de Witwatersrand, Johannesburgo. Ha asesorado y testificado en procedimientos judiciales en los que se discutía sobre la admisibilidad de las pruebas científicas.

rano del año pasado y en la ciudad de Nueva York, durante una audiencia preprocesal, en el caso del *Pueblo v. Castro*, Michael L. Baird, de la Compañía Lifecodes, uno de los dos principales laboratorios privados forenses de Estados Unidos, informó que la posibilidad de una coincidencia fortuita entre una mancha de sangre y el sospechoso era de 1 entre 100 millones. Eric S. Lander, de la Universidad de Harvard y el Instituto de Tecnología de Massachusetts, examinó los mismos datos y llegó a establecer la posibilidad de 1 entre 24. Ultimamente, varios solicitantes de pruebas de ADN denunciaron los resultados del caso como carentes de fiabilidad científica. Algunos de los métodos básicos de laboratorio de la empresa Lifecodes fueron rechazados, sembrando la duda sobre la integridad de cientos de condenas criminales anteriores. El actual debate sobre el test del ADN pone de relieve la necesidad de comportarse con mayor rigor ante las dificultades que aparecen cuando una compleja tecnología científica se introduce como prueba en un tribunal de justicia.



1. LA PERITA Lorraine Flaherty, genetista del Departamento Municipal de Salud de Nueva York, informa sobre el análisis de ADN durante la audiencia preprocesal en el caso el *Pueblo v. Castro*, celebrada el pasado año. El magistrado Gerald Sheindlin resolvió con posterioridad en contra de la admisión de la huella del ADN como prueba dentro del proceso por doble asesinato. El caso fue el primero en el que se examinaron con detenimiento –y en el que se rechazaron– los tests de ADN, que se habían utilizado para obtener la convicción en cientos de juicios anteriores.



2. IDENTIFICACION por ADN. Se apoya en la existencia de secuencias del ADN denominadas RFLP (siglas de la expresión inglesa que designa los polimorfismos longitudinales del fragmento de restricción); esas regiones contienen secuencias del "centro" (*color*) que se repiten en tándem con una frecuencia que varía de una persona a otra. Cada RFLP puede identificarse mediante una sonda especial que reconoce y se enlaza con cualquier fragmento que posea la secuencia del "centro". Enzimas especiales extraen del ADN los RFLP. El trabajo forense se realiza tomando ADN extraído de una prueba, por ejemplo, de sangre de un sospechoso, descomponiéndolo en RFLP que se separan por electroforesis en gel. Una sonda radiactiva enlaza o hibrida con los RFLP, cuyas posiciones se registran entonces en bandas oscuras en una película de rayos X. Si los patrones bandeados de la prueba y de la del sospechoso coinciden, se calculará la probabilidad de que ello se deba al azar.

Por definición, un proceso se propone descubrir la verdad. Para ayudar a los jurados en su cometido, la ley permite que calificados expertos testifiquen y expresen su opinión en materias para las que se encuentran profesionalmente cualificados. La naturaleza esotérica de una opinión experta, sumada a la jerga y los títulos académicos de los peritos, pueden cubrir con un manto de infalibilidad sus testimonios. De aquí que, para prevenir la posible influencia que los testimonios expertos ejerzan sobre los jurados, los tribunales de los Estados Unidos acostumbran revisar el material en una audiencia preprocesal o en ausencia del jurado.

Para que un test forense sea admitido como prueba ha de cumplir, enseña el sentido común, tres condiciones: la teoría científica en cuestión tiene que ser considerada válida por la comunidad científica, debe reconocerse la fiabilidad de la técnica y debe demostrarse que ésta se aplicó adecuadamente en el caso concreto.

Pero no siempre rige en un tribunal de justicia el sentido común. Una mayoría de tribunales de Estados Unidos deciden acerca de la admisibilidad de pruebas científicas basándose en los principios esenciales establecidos, en 1923, por *Frye v. U. S.*, en el cual el Tribunal de Apelación del distrito de Columbia confirmó la decisión de un tribunal inferior de excluir pruebas derivadas de un precursor del polígrafo. "Es difícil de afirmar el momento preciso en que un principio o descubrimiento científico atraviesa la frontera entre las fases experimental y demostrable", declaró el tribunal en el caso *Frye*. "En algún lugar de esta zona incierta, la fuerza evidenciadora del principio tiene que poder reconocerse, y mientras el tribunal debe recorrer un largo camino en admitir el testimonio de los expertos deducido de un principio o descubrimiento científico ampliamente establecido, el objeto sobre el cual se realiza la declaración tiene que estar lo suficientemente establecido para haber ganado la aceptación general en el campo particular al que éste pertenece."

Jueces, científicos, fiscales y juristas han criticado el criterio *Frye*. Peca, para algunos, de excesiva vaguedad. Para otros, resulta demasiado restrictivo; y los hay que se quejan de que no es suficientemente restrictivo. ¿Debería "la aceptación general" exigir, por ejemplo, la unanimidad o la simple mayoría de la opinión de los científicos? Además, ¿qué debe recibir aceptación general en el caso de la tipificación del ADN?

¿Acaso el principio teórico según el cual dos individuos, con excepción del caso de gemelos idénticos, no pueden tener el mismo ADN? ¿Son tal vez las diversas técnicas empleadas en el test, tales como el análisis de Southern ("Southern blotting") y la electroforesis? ¿O es la aplicación específica de la estructura del ADN a la sangre seca y a las manchas de semen recogidas de la escena de un crimen?

Más. ¿Cuál es el campo particular apropiado para ser aceptada una u otra técnica? ¿Tiene que aceptarse el test de la estructura del ADN sólo por los serólogos forenses, o tiene que ser reconocido también por genetistas, hematólogos y bioquímicos? En un reciente caso de California, se rechazó la prueba del ADN analizado mediante la utilización de la reacción en cadena de la polimerasa (RCP) porque este método no lo admitía la generalidad de la comunidad científica forense. Sin embargo, varios meses antes, un tribunal de Texas, al evaluar el mencionado método de la RCP, prestó mayor atención a la opinión de los biólogos moleculares y genetistas, llegando a la conclusión contraria.

Para muchas de las aplicaciones de la ciencia al mundo forense, las bases teóricas están bien establecidas y el debate legal se centra principalmente en determinar si se tiene que probar sólo que una técnica es aceptada con carácter general para la investigación científica o, con mayor exactitud, si la técnica es fiable cuando se aplica a la ciencia forense.

¿Por qué la distinción entre la aplicación extraforense y la forense? Los científicos aceptan comúnmente que, cuando cualquier tecnología se ha utilizado en diferentes aplicaciones, en el foro por ejemplo, debe haber superado todas las pruebas de fiabilidad para asegurar un conocimiento empírico del uso y de las limitaciones de dicha técnica. Precisamente, muchas de las técnicas que se han demostrado fiables para la investigación –la poligrafía, por ejemplo– se han cuestionado cuando han pasado a aplicarse al trabajo forense.

Con mayor claridad, para que los tribunales puedan valorar las pruebas forenses, los jueces y los abogados tienen que estar capacitados para ponderar los aspectos científicos en cuestión. Lamentablemente, fiscales y abogados, por regla general, se limitan a revisar la acreditación de los expertos (basándose por lo común en indagaciones superficiales sobre su afiliación institucional y sus publicaciones) y a verificar los hechos sobre los que se basan las conclusiones de los peritos. La causa de tan limitada indagación es sencilla: la mayoría de los fiscales, abogados y jueces carecen de un adecuado bagaje científico para argumentar o decidir la admisibilidad de un testimonio experto. A menudo los jueces creen –equivocadamente, en nuestra opinión– que se sirve mejor a la justicia admitiendo un testimonio experto como prueba y delegando en el jurado la determinación de su valor.

El problema de la ignorancia científica se agrava con la tendencia de los jueces a negarse a reconsiderar la validez de una particular clase de prueba científica una vez aceptada ésta por otro juez en un caso anterior. Esta práctica se funda en la reconocida necesidad de respetar los precedentes, con el fin de garantizar la uniforme administración de la justicia. Pero en el caso de los tests forenses el frecuente rechazo de los tribunales a ponerse al día sobre los principios científicos implicados ha sido el responsable de muchos "descarrilamientos" de la justicia.

Quizás el más conocido ejemplo de este problema es el así llamado test de la parafina (primo del test de Greiss empleado en la investigación de los seis de Birmingham), que los laboratorios criminológicos de los Estados Unidos empleaban para detectar residuos de nitritos y de nitratos, presumiblemente provenientes de la pólvora, en las manos de los sospechosos, a fin de demostrar que éstos habían disparado recientemente un arma. El test fue admitido por primera vez como prueba científica en un juicio celebrado en Pennsylvania en 1936. Otros estados adoptaron después esta decisión sin realizar una investigación independiente.

En los siguientes 25 años, innumerables personas fueron condenadas con la ayuda de ese test. Hasta mediados de los sesenta no se demostró con un exhaustivo estudio científico los manifiestos fallos del test de la parafina: un elevado número de sustancias distintas de la pólvora dieron una lectura positiva: orina, tabaco, ceniza de cigarro, fertilizantes y pintura de uñas, entre otros. En estos casos el juicio no fue objetivo y dio lugar a la condena de acusados de crímenes por pruebas que más tarde se demostraron carentes de valor.

Más recientemente, el debate sobre las pruebas judiciales se ha centrado en dos aplicaciones de la biotecnología: el análisis de indicador de proteínas y la identificación por ADN. Ambas técnicas acuden a la electroforesis en gel para revelar diferencias genéticas llamadas polimorfismos, en las proteínas de la sangre y en el ADN. Estas dos técnicas permiten atribuir la sangre, semen u otros restos encontrados en la escena de un crimen a un sospechoso o a la víctima.

A finales de los años sesenta, los laboratorios de criminología tomaron interés por los polimorfismos proteicos de la población. Las técnicas para el estudio de los polimorfismos de proteínas se desarrollaron, en un comienzo, para el estudio de la genética de poblaciones, se sometieron a pruebas experimentales, fueron temas de publicación en revistas científicas y se comprobaron por distintos investigadores. Las técnicas fueron luego modificadas por y para el personal jurídico, con el fin de acomodarlas a los problemas que planteaban las muestras forenses, tales como su frecuente cantidad limitada, su edad desconocida y la presencia de contaminantes sin identificar. Estas modificaciones apenas si llegaron a las revistas científicas o se corroboraron por expertos independientes.

Por ejemplo, los genetistas moleculares estudian las proteínas polimórficas en los eritrocitos y suero utilizando sangre fresca y líquida, analizados bajo condiciones controladas de laboratorio, todas sujetas a estrictas revisiones científicas por otros expertos. Estas técnicas se adaptaron luego para su uso en muestras forenses con sangre seca, mediante la introducción de varias modificaciones, muy pocas de las cuales habrían de someterse a evaluaciones científicas comparables. Nadie exploró nunca los efectos que el entorno ejercía sobre las muestras: calor, humedad, temperatura y luz. Ni nadie comprobó nunca la queja de que las muestras forenses habían sido alteradas por microbios y sustancias desconocidas halladas con frecuencia en las calles o sobre las alfombras.

Una de las principales modificaciones realizadas por los laboratorios forenses fue la del test "multisistema". En su versión original, se identificaron tres proteínas polimórficas diferentes con un único procedimiento; se trataba de deducir tanta información cuanta fuera posible de una muestra pequeña. El triple indicador del test de multisistema se modificó todavía más añadiéndole un cuarto indicador proteico en 1980 por el laboratorio de serología del Instituto Municipal de Análisis Clínicos de Nueva York.

En 1987, las pruebas derivadas del multisistema "cuatro-en-uno" se introdujeron en cientos de acusaciones

criminales en el estado de Nueva York. En ese año, no obstante, durante una audiencia preprocesal en el *Pueblo v. Seda*, el director del Instituto Municipal de Análisis Clínicos admitió en un interrogatorio que sólo se había publicado un artículo científico sobre ese sistema –y en ese artículo se recomendaba el uso del test sólo para sacar a la luz contradicciones obvias debido a un sesgo que tendía a oscurecer los resultados.

En el *Pueblo v. Seda*, el juez determinó que el multisistema de "cuatro-en-uno" no cumplía el criterio *Frye* de aceptación general por parte de la comunidad científica y, por tanto, no podía aducirse como prueba. Por desgracia, *Seda* fue el primer caso en el que, utilizándose el test, la defensa se preocupó de citar a testigos para oponerse a la tecnología. En virtud de ello, se pone ahora en duda la objetividad de cientos de condenas anteriores.

En los dos últimos años, la tipificación del ADN ha ido consolidándose, sin eclipsar los marcadores de proteínas en la identificación forense. La teoría se basa en un método desarrollado para estudiar las enfermedades hereditarias, en su doble propósito: identificar los genes causantes de enfermedades en familias portadoras de un trastorno congénito y predecir el riesgo de un individuo cuando se conoce el gen causante.

La investigación criminal ha adoptado la nueva técnica porque ofrece dos notables ventajas sobre los marcadores de proteínas al uso. En primer lugar, la tipificación por ADN puede aplicarse a muestras menores y viejas. En segundo lugar, goza, en comparación, de una certeza triple a décuple sobre la anterior. Lifecodes asegura, en su presentación publicitaria, que su test "capacita para identificar un determinado individuo de entre toda la población mundial". Por si esto no fuera suficiente, la empresa Cellmark Diagnostic, de Germantown, principal competidor de Lifecodes, afirma respecto de su propio método que "la posibilidad de que cualesquiera personas puedan tener la misma 'huella' de ADN es de 1 entre 30.000 millones". Pero, como demostraron los testimonios del caso *Castro*, semejantes aseveraciones pueden ponerse en duda.

La difusión de la tipificación por ADN se basa en la idea de que el retrato de ADN identifica el "código genético" propio de cada sujeto; es, por tanto, tan exclusivo como la huella dactilar. La verdad es que, dado que el 99 por ciento de los 3000 millones de pares de bases del ADN humano son idénticos para todos los individuos, los forenses buscan métodos que les permitan aislar las escasas regiones variables. Estas regiones, que pueden segmentarse del ADN mediante enzimas de restricción, se denominan polimorfismos longitudinales de fragmentos de restricción, o RFLP por sus siglas inglesas.

La identificación por ADN, requiere RFLP que sean altamente polimórficos; esto es, que presenten el mayor número de variantes, o alelos, en la población. Se sabe que ciertas regiones del ADN humano contienen secuencias "centrales"que se repiten en "tándem", como los vagones de un tren. El número de estas secuencias repetidas varía bastante de una persona a otra; un individuo puede tener trece unidades repetidas en un locus donde otra persona tendría 29. Las enzimas de restricción cortan el ADN en millones de piezas, incluidos los fragmentos que contienen los segmentos repetidos. Dado que el número de segmentos repetidos varía según el individuo, así también variará la longitud total de estos fragmentos.

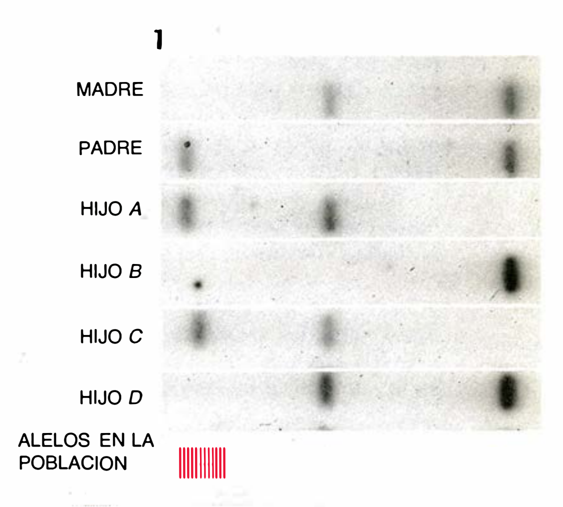
¿Cómo aislar estos fragmentos variables de la multitud de segmentos irrelevantes del ADN? La respuesta descansa en las "sondas", que se enlazan sólo a los fragmentos que portan la secuencia "central". Si la secuencia "central" aparece en un solo locus del ADN, la sonda se convierte en sonda de locus único. Si la secuencia "central" aparece en muchos loci distintos, hablaremos de una sonda multilocular. Los laboratorios forenses emplean tres métodos distintos de tipificación del ADN: RFLP de locus único, RFLP multilocular y reacción en cadena de la polimerasa. Teniendo en cuenta que el sistema de un solo locus es el más empleado en la identificación forense del ADN, lo explicaremos con algún detalle.

Para la identificación forense por ADN a través del análisis de RFLP de un solo locus, el ADN procedente de distintas fuentes se digiere mediante enzimas de restricción situadas en pistas separadas de un gel electroforético y sometidas a un campo eléctrico. El campo empuja los fragmentos a través de la pista, circulando los fragmentos pequeños a mayor velocidad que los grandes. Los fragmentos, clasificados ya por su tamaño, se desnaturalizan en hebras individuales y se transfieren del gel a una membrana de nitrocelulosa o nylon, la cual fija los fragmentos en su lugar. (Incidentalmente, ¡cualquiera que manipule nitrocelulosa podría dar positivo en el test de Greiss!)

Llegados aquí, se aplica una sonda radiactiva; ésta hibrida –se enlaza con– los fragmentos polimórficos. Se deja entonces la mezcla sobre una placa de película de rayos X para producir una autorradiografía. Los fragmentos radiactivamente marcados aparecen en una serie de bandas, que recuerdan a los raíles de un tren con traviesas irregularmente espaciadas; la posición de las bandas constituye una medida del tamaño de los fragmentos polimórficos. La sonda puede desecharse, y recurrirse entonces a otra para identificar un nuevo grupo de alelos.

La autorradiografía resultante de la sonda de un solo locus demostrará, por lo común, la presencia de alelos de dos tamaños diferentes, uno heredado de cada progenitor; tal patrón indica que esa persona es heterocigótica para el locus. Si la sonda revela sólo un alelo distinto, se admite que esa persona heredó el alelo del mismo tamaño de ambos padres y será homocigótica para dicho locus. Los laboratorios de análisis forenses del ADN suelen emplear varias sondas uniloculares, cada una de las cuales se enlaza en un sitio distinto.

Para determinar si dos muestras de ADN poseen el mismo origen, se examinan las bandas identificadas por una sonda concreta en el autorradiógrafo y se comprueba si coinciden o no. Se han de confrontar con los datos que ofrecen los estudios de genética de poblaciones para averiguar la frecuencia de aparición del tamaño de ese alelo en particular. Un alelo típico podría encontrarse en un 10 por ciento de la población, por lo que no sería inverosímil que dos personas elegidas al azar portaran el mismo alelo. Pero



3. TIPIFICACION FORENSE por ADN. Se trata de un procedimiento rodeado de puntos obscuros. Si se acepta que las autorradiografías del grupo 1 corresponden a una familia, entonces los alelos de los hijos tienen que derivar de los padres, aun cuando una de las bandas del

si consideramos los alelos de tres o cuatro sitios distintos, disminuye la posibilidad de que coincidan, en dos individuos, los mismos alelos para todos los sitios. Esta es la hipótesis que otorga a la prueba del ADN su poder de persuasión.

¿Hasta qué punto la prueba forense del ADN respeta el criterio de *Frye*? Ciertamente la teoría de referencia –que dos personas, a excepción de dos gemelos idénticos, no pueden tener el mismo ADN– es incuestionable, y así la identificación por el ADN es posible en línea de principio. Pero, ¿se está aplicando esta teoría de tal manera que permita obtener un test forense fiable? Y si es así, ¿se están desarrollando estas pruebas correctamente?

En la investigación científica y médica, el análisis del ADN se utiliza sobre todo para hallar la herencia de los alelos causantes de enfermedad en el seno de una familia. En esta aplicación de diagnóstico, no obstante, puede admitirse que un alelo procede de la madre y otro del padre. Dado que cada progenitor tiene sólo dos alelos para un gen determinado, con excepción de una mutación, el patrón observado en el niño se limita como máximo a cuatro posibles combinaciones. Además, si los resultados son ambiguos, se puede repetir el experimento con una muestra de sangre fresca o recurrir a los alelos de otros miembros de la familia.

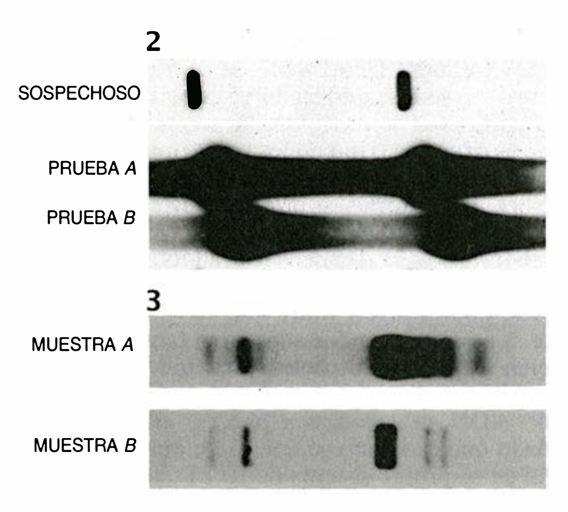
En la tipificación forense por ADN, sin embargo, es mucho más difícil determinar si un alelo de una muestra es idéntico a otro alelo extraído de una muestra distinta. En los sistemas de RFLP empleados en la ciencia forense, el número de alelos puede ascender a varios cientos –en contraste con los cuatro de los cuales se tiene que elegir para la identificación de alelos de un niño cuyos padres se conocen. En efecto, los sistemas forenses de RFLP producen tantos alelos diferentes que virtualmente forman una serie continua. En algunos casos, los alelos más comunes pueden reunirse dentro de un intervalo de seis milímetros en una pista de 33 centímetros. La electroforesis en gel puede resolver sólo un limitado número de alelos distintos –entre 30 y 100 quizás, a tenor del RFLP en cuestión– y así alelos similares en tamaño, aunque no iguales, pueden considerarse idénticos. Puede, pues, resultar difícil declarar con seguridad que una banda coincide con otra. Y lo que es peor, con frecuencia las muestras forenses están limitadas en cantidad y, por tanto, no pueden examinarse de nuevo si surge alguna duda.

Dificultades propias que se complican con el problema del "desplazamiento de bandas". Este fenómeno, que aparece cuando los fragmentos de ADN cursan a diferente velocidad por las distintas pistas del gel, se ha atribuido a diversos factores: preparación del gel, concentración de ADN de la muestra, cantidad de sal en la solución de ADN y contaminación del mismo, entre otras variables. El desplazamiento de bandas puede presentarse aun cuando las diversas pistas posean ADN procedente de la misma persona. Dado que los tamaños de los alelos en los sistemas forenses de RFLP están espaciados a muy corta distancia, es difícil determinar si la posición relativa de las bandas se debe exclusivamente al tamaño de los fragmentos del alelo o si interviene acaso el desplazamiento de bandas.

El tratamiento del desplazamiento de bandas en la práctica judicial constituye una excelente ilustración de los problemas que pueden surgir cuando los tribunales, sin el proceso de comprobación científica realizado por expertos, acometen la tarea de determinar la fiabilidad de un método. Hace dos años, cuando la prueba del ADN entró en las salas de justicia norteamericanas, la mayoría de los científicos forenses del ADN rechazaron la existencia del desplazamiento de bandas. Pero ahora algunos expertos opinan que ese corrimiento se produce en al menos el 30 por ciento de los tests forenses del ADN. Hay varias teorías sobre su causa, pero no se ha publicado ningún artículo de verificación.

Los laboratorios forenses del ADN se encuentran inmersos en el desarrollo de sondas especiales aplicables a loci monomórficos –fragmentos de enzimas de restricción que tienen el mismo tamaño en cada persona– como posible método para controlar el corrimiento de bandas. En teoría, si las regiones monomórficas están desplazadas, se sabrá que se ha producido ese corrimiento, pudiéndose calcular entonces un factor de corrección. La dificultad radica de nuevo en que ni este método, ni ninguna otra posible solución, han recibido corroboración por parte de otros expertos.

En un caso de violación que se juzgó en diciembre de 1989 en Maine, el *Estado v. McLeod*, el director del laboratorio que supervisó los tests del ADN para la fiscalía testificó que un factor de corrección derivado de una





niño *C* aparece visiblemente desplazada. Pero si la misma pista correspondiera a una persona de la que se desconoce su ascendencia, entonces la banda podría pertenecer a uno de los restantes alelos (*bandas en color*) observados en la población. En el grupo 2, los patrones de las bandas del sospechoso y de las pruebas *A* y *B* parecen estar mutuamente desplazados, señal plausible de un corrimiento de la banda. En el grupo 3, la muestra *A* contiene todas las bandas de la muestra *B*, junto con otras bandas, posiblemente producidas por contaminantes. En el grupo 4, un sospechoso tiene dos bandas, mientras que la prueba forense presenta sólo una; la banda "desaparecida" podría ser el resultado de la destrucción de los fragmentos mayores a causa de la degradación del ADN. Por otro lado, todos estos casos pueden indicar también una verdadera diferencia genética.

sonda monomórfica le permitía declarar la coincidencia entre la sangre del sospechoso y el semen encontrado en la víctima, a pesar de que las bandas aparecieron claramente desplazadas. Cuando se puso de manifiesto que una segunda sonda monomórfica indicaba un factor de corrección menor, que no justificaba la disparidad entre las bandas, reconoció que las sondas monomórficas podrían producir factores de corrección incoherentes. Alegó, sin embargo, que la primera corrección era la apropiada para las bandas en cuestión. El fiscal, no obstante, reconoció el desatino de defender este argumento, dada la ausencia de datos publicados sobre esta materia, desechando la prueba del ADN. En docenas de otros casos, sin embargo, los jueces se han apoyado en este mismo tipo de argumentos, a pesar de que no existía un cuerpo de investigación para aconsejar al órgano jurisdiccional. Como indica el sentido común, el lugar apropiado para tratar primero estos asuntos son las revistas científicas, no los tribunales.

Otro problema importante que aparece en la tipificación forense del ADN es la contaminación. Con gran frecuencia, las muestras forenses recobradas de la escena de un crimen están deterioradas o contaminadas. La presencia de bacterias, materia orgánica y la degradación aumentan el riesgo tanto de falsos positivos como de falsos negativos. Por ejemplo, la contaminación puede degradar el ADN hasta destruir los fragmentos mayores. En estas circunstancias, una sonda que tendría que producir dos bandas podría rendir una sola (la banda más pequeña).

Los laboratorios de investigación emplean controles internos para evitar una mala interpretación que pueda resultar de tales artefactos. Pero estos controles podrían no ser idóneos para el trabajo forense. Por ejemplo, uno de los métodos seguidos para controlar el corrimiento de bandas consiste en ejecutar un experimento mixto: la muestra *A* procede por la pista uno, la muestra *B* por la pista dos y *A* y *B* por la pista tres. Si ambas muestras pertenecen a la misma persona, entonces la pista tres producirá un grupo de bandas; si son de distintas personas, aparecerán dos grupos de bandas. Desgraciadamente, en la práctica forense, no se cuenta a menudo con material suficiente para ejecutar un experimento mixto. Además, estudios recientes sin publicar indican que ciertos contaminantes, los tintes por ejemplo, pueden adherirse al ADN y alterar su movilidad en el gel, de suerte que un experimento mixto que empleara muestras de una misma persona puede originar dos grupos de bandas.

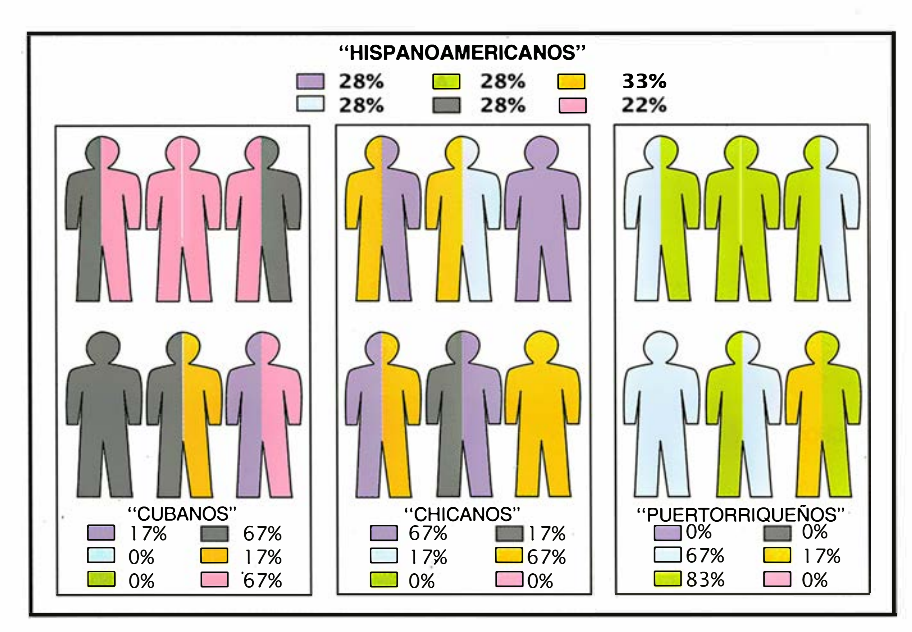
El poder de la identificación forense por ADN radica en su capacidad, no sólo para demostrar que dos muestras exhiben el mismo patrón, sino también para sugerir que el patrón es rarísimo. La validez de los datos y las hipótesis sobre los que se han basado los laboratorios forenses para estimar la rareza son objeto de debate entre la comunidad científica.

Existen dos objeciones especialmente importantes. Primera, dada la dificultad que entraña discriminar con precisión entre las docenas de alelos de un locus particular, el cálculo de la frecuencia con que cada alelo aparece en la población es, de suyo, arduo. Segunda, las ecuaciones estadísticas para calcular la frecuencia de un patrón de alelos en particular se aplican sólo a una población resultante de un apareamiento aleatorio –una condición conocida por equilibrio de Hardy-Weinberg.

Si una población se halla en equilibrio de Hardy-Weinberg, podemos aceptar que los tipos alélicos se encuentran mezclados al azar. La presencia de un alelo es entonces independiente de la presencia de un segundo alelo. Por ello se puede calcular la frecuencia del "genotipo", o de un par particular de alelos, para un locus específico, mediante la multiplicación de la frecuencia de cada alelo y duplicándolo (dado que se tiene la misma posibilidad de heredar cada alelo de ambos padres). La frecuencia de un genotipo para una combinación de loci se obtiene entonces multiplicando simplemente la frecuencia del genotipo para cada locus individual. Por ejemplo, si los genotipos en los loci *A*, *B*, *C* y *D* aparecen en un 10 por ciento de la población, entonces la probabilidad de que una persona presente estos genotipos en los cuatro loci es 0,1 multiplicada por sí misma cuatro veces: 0,0001.

Los laboratorios forenses dedicados a la investigación del ADN han llevado a cabo estos cálculos basándose en los datos recopilados por ellos mismos. Datos que, en su mayoría, ni se han publicado en revistas científicas ni se han corroborado por otros expertos. Uno de los problemas radica en que ninguno de los principales laboratorios utiliza el mismo sistema de RFLP. Y aun cuando los laboratorios se decidiesen a adoptar sondas y enzimas uniformes, el resultado podría seguir difiriendo bastante, a no ser que todos adoptaran también idénticos protocolos. Con todo, los laboratorios comerciales de tests de ADN son reacios a hacerlo así, dado que cada uno se considera dueño de su propio sistema de RFLP; las sondas y enzimas se venden o se cede su licencia a laboratorios forenses del país.

Otro aspecto grave lo tenemos en las poblaciones, algunas de las cuales podrían no encontrarse en equilibrio,



4. LOS DATOS POBLACIONALES carecen quizá de fiabilidad suficiente para calcular con exactitud la frecuencia de un genotipo. En la hipotética población hispanoamericana aquí representada, una particular posición de ADN, o sitio, tiene seis alelos distintos, cada uno representado por su propio color. Los individuos heterocigóticos aparecen sombreados con dos colores para representar los dos alelos heredados de sus padres; los individuos homocigóticos, que han heredado el mismo alelo de ambos padres, aparecen sombreados con un solo color. Las frecuencias alélicas en toda la población difieren notablemente de las frecuencias alélicas en los subgrupos mostrados aquí.

en cuyo caso ni los alelos ni los distintos loci serían independientes. Ante una población así, no existe acuerdo en cómo ha de calcularse la frecuencia de un genotipo (dada la limitación de las bases de datos de los laboratorios forenses del ADN). En el estado actual de la cuestión, los genetistas de poblaciones discuten si las distintas comunidades étnicas y raciales muestran subestructuras poblacionales importantes hasta el punto de desvirtuar el uso de las bases de datos para los sistemas altamente polimórficos empleados en la identificación forense del ADN. Por ejemplo, ¿constituyen los hispanos en Estados Unidos una población de mezcla sencilla? ¿Existen apareamientos no aleatorios, con cubanos propensos a mezclarse con otros cubanos, y con chicanos propensos a mezclarse con otros chicanos? ¿Debería haber una base de datos específica sobre frecuencias alélicas en cada una de estas subpoblaciones? Para responder a ello, los genetistas de poblaciones necesitarán reunir más datos.

En Estados Unidos se ha recabado la prueba del ADN en más de 1000 investigaciones criminales, pero sólo en unas pocas docenas de casos se ha cuestionado dicha prueba en una audiencia preprocesal. De acuerdo con nuestros propios estudios sobre estas audiencias, hasta la aparición del caso *Castro* en Nueva York, ninguna de ellas abordó los problemas que entraña distinguir la identificación forense del ADN de su identificación diagnóstica. Menos en dos de las primeras audiencias, en todas las demás el abogado defensor no logró reunir datos poblacionales sobre los que fundar las predicciones de las frecuencias alélicas. En las cuatro primeras decisiones del tribunal de apelación sobre la prueba del ADN, la defensa no pudo presentar ningún perito, y el interrogatorio de los peritos de la acusación fue como mínimo superficial.

La defensa explicó en un caso que había solicitado de docenas de biólogos moleculares su testimonio, pero todos se negaron. Entrevistas realizadas con algunos de esos expertos revelaron que la mayoría de ellos, familiarizados con las investigaciones científicas que incluían la tipificación por ADN, admitían que la aplicación forense de la técnica sería igualmente fiable. Otros, conscientes de los posibles problemas, eran contrarios a criticar públicamente la tecnología por miedo a que dichas críticas pudieran ser mal interpretadas como un ataque general a la ciencia de referencia.

Hay otro problema: con frecuencia los abogados defensores no disponen de tiempo suficiente o de los medios necesarios para enfrentarse con la complejidad de estas materias. Suele recurrirse a las nuevas pruebas científicas para resolver crímenes violentos, y en tales casos los acusados provienen en su mayoría de las capas sociales más bajas. En consecuencia, la mayoría de ellos tienen que confiar su defensa a un abogado de oficio, seleccionado en las oficinas públicas de defensa, en sociedades de ayuda legal o abogados particulares más baratos. Muchos de estos abogados son excepcionalmente competentes, pero con frecuencia carecen del tiempo y medios necesarios para poder ofrecer una oposición seria a la prueba científica. Y, ¿por qué no decirlo?, abundan también los abogados poco preparados que se ven rebasados por la complejidad del tema.

Más aún. En la mayoría de los estados un abogado de oficio no contará con un perito experto si no es con la aprobación del juez. En casos recientes de identificación por ADN en Oklahoma y Alabama, la defensa no contó con ningún experto, dado que el presidente del tribunal rechazó la autorización de fondos para tal fin. En el caso *Castro*, un factor crítico para el éxito de la defensa radicó en la participación de varios acreditados científicos –la mayoría de los cuales testificó sin cobrar–.

Teniendo en cuenta que los defensores que pueden oponerse a las pruebas científicas constituyen una minoría, consideramos que la constante revisión de los métodos forenses es la única manera de asegurar la justicia. En particular, deben establecerse los criterios nacionales antes de que una técnica científica pase del laboratorio de investigación a la sala de justicia, y tiene que contarse con leyes que aseguren que esos criterios se cumplan.

La regulación de los criterios forenses cuenta con un modelo excelente: el Acta de Mejoramiento de los Laboratorios Clínicos de 1967 (reformada en 1988). El Acta estableció un sistema para acreditar y confirmar la capacidad de los laboratorios clínicos que están al servicio de la profesión médica. La ley fue promulgada para asegurar que tales laboratorios, que no están sujetos a la comprobación rigurosa por otros expertos, como los de investigación, aporten, sin embargo, productos y servicios fiables.

Ocurre, por contra, que ningún laboratorio criminal privado o público está controlado hoy en día por agencia alguna del gobierno. Tampoco existe ninguna exigencia que acredite que los laboratorios forenses someten sus pruebas a controles adecuados. Ni es tranquilizador que no se hayan establecido criterios objetivos para la interpretación de los datos forenses. El 80 por ciento de los laboratorios forenses de Norteamérica dependen de la jurisdicción policial o de la fiscalía del estado y, por tanto, existe un ancho portillo para la parcialidad, dado que los técnicos pueden conocer los hechos del caso. En breve, contamos con una mayor regulación de los laboratorios clínicos que determinan si se padece mononucleosis que la que existe sobre los laboratorios forenses capaces de realizar tests de ADN que pueden llevar una persona a la silla eléctrica.

La acreditación y la fiabilidad de las pruebas sólo funcionarán si se realizan con cuidado. Los criterios nacionales para las pruebas forenses tienen que servir a los intereses de la justicia, y no a las partes con intereses en la tecnología. Esto no es un peligro imaginario: desde 1988 hasta 1989, un comité de la Asociación Americana de Bancos de Sangre se ocupó de desarrollar los criterios nacionales para la tipificación forense del ADN, contando con la colaboración de dos expertos en genética molecular; se trataba de dos jefes de investigación de Lifecodes y de Cellmark, las dos compañías que desarrollan toda la identificación comercial forense del ADN en Estados Unidos.

Algunos observadores sugieren que se delegue la tarea de sentar los criterios nacionales sobre la identificación forense por ADN en la Oficina Federal de Investigación (FBI). Pero hay una razón para ser cauteloso con esta medida. Durante el último año, el FBI comenzó a realizar identificación forense por ADN sin antes publicar su metodología en revistas científicas. En algunas audiencias preprocesales en las que se pusieron en tela de juicio los tests de ADN dirigidos por el FBI, la Oficina fue reacia a ofrecer los datos sobre los cuales se basaban sus informes, alegando su "privilegio contra la autocrítica" –un concepto que, incidentalmente, encuentra pocos precedentes en la ley. El FBI además se opuso a la comprobación de los resultados por expertos independientes, alegando que ningún extraño está capacitado para evaluar la actuación de la Oficina. Por otro lado, en un reciente congreso sobre la tipificación del ADN organizado por el FBI, que reunió a 300 científicos forenses de todo el país, el personal del FBI fue el único en negarse a las propuestas que pedían que los labo-

ratorios explicaran por escrito los fundamentos de sus conclusiones, y que los informes fueran firmados por los científicos y por los técnicos que dirigieron la prueba.

La actitud del FBI en estas cuestiones está en contra de cualquier norma establecida por la comunidad científica. Por ejemplo, si el autor de un artículo científico se negara a someter sus datos a una comprobación rigurosa por otros, el artículo sería rechazado. Existe también un claro consenso a favor de las pruebas de verificación independiente. Si un laboratorio clínico se niega a cumplir con una exigencia pública razonable, como es examinar los resultados de sus pruebas, se arriesga a perder su credibilidad. Sería inimaginable para un laboratorio que éste enviara al ginecólogo de una mujer embarazada un informe sin firmar en el que únicamente apareciera la palabra "aborto".

Los científicos independientes comienzan, por fin, a darse cuenta del apremio de estos asuntos. El pasado otoño, un grupo de expertos en análisis forenses por ADN del estado de Nueva York redactó unas condiciones detalladas para certificar, registrar y acreditar a los laboratorios forenses de ADN. Se espera que la Oficina de Asesoramiento Tecnológico del Congreso haga público su informe sobre la regulación de la tipificación del ADN cuando este artículo vea la luz. La Academia Nacional de Ciencias ha creado un comité para estudiar los criterios apropiados de la tipificación por ADN y se espera que publique un informe a principios del próximo año.

Es lamentable que estas medidas se hayan adoptado sólo después de que varios errores en la actual tipificación del ADN se dieran a conocer en las salas de justicia. Esperamos que las reformas realzarán el interés de la justicia en el futuro, aunque esto no consuele a los acusados que fueron erróneamente condenados, ni a las víctimas de un crimen que contemplaron cómo el verdadero culpable era liberado. Confiamos en que, con criterios nacionales apropiados y con una regulación de los laboratorios forenses, nuevas técnicas forenses tan poderosas como la tipificación por ADN puedan desempeñar un importante y beneficioso papel en la justicia criminal. Cuando todo esto sea una realidad, no debería existir un mejor test para identificar a un criminal o para absolver a un inocente.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

Randolph N. Jonakait, WILL BLOOD TELL? GENETIC MARKERS IN CRIMINAL CASES. 31 *Emory Law Journal*, págs. 833-912; Otoño de 1982.

Black, A UNIFIED THEORY OF SCIENTIFIC EVIDENCE. 56 *Fordham Law Review*, págs. 595-695; 1988.

THE CLINICAL LABORATORY IMPROVEMENT AMENDMENTS OF 1988. 42 U.S. Code, Sección 263a, 1988.

DNA FINGERPRINTING ON TRIAL. Eric S. Lander en *Nature*, vol. 339, n.º 6225, págs. 501-505; 15 de junio de 1989.

DNA TECHNOLOGY AND FORENSIC SCIENCE. Banbury Report 32. George Sensabaugh y Jan Witkowski. Cold Spring Harbor Laboratory, 1989.

LA PRUEBA CIENTÍFICA EN LOS TRIBUNALES ESPAÑOLES

En el derecho procesal español, la prueba pericial es aquel medio de prueba de carácter personal que consiste en la aportación al proceso por un tercero de una serie de conocimientos especializados o técnicos, que el juez no posee, con el fin de facilitarle la percepción y la apreciación de hechos controvertidos. Por tanto, el perito es la persona que, sin ser parte de un proceso, aporta al mismo sus conocimientos científicos, prácticos o técnicos, con el fin de proporcionar al juez las "máximas de experiencia" especializadas para valorar o percibir determinados hechos. Nuestro ordenamiento jurídico no posee una completa y adecuada regulación sobre la prueba pericial científica.

Si bien han aumentado los medios científicos con los que cuenta la policía judicial, su aplicación ha dependido, generalmente, de la importancia del asunto. ya fuera por la trascendencia de la cuestión de fondo, ya por el relieve social de los protagonistas. En nuestros procedimientos judiciales se da importancia a la prueba científica siempre que queden comprobados no sólo la seguridad de la misma, sino también el cumplimiento ele todas las garantías previas necesarias para la obtención de los elementos que luego se analicen o estudien para la emisión del informe. Los informes periciales, en cualquier caso, para que sean válidos, deben ratificarse en el juicio oral por los responsables de su emisión, al objeto de facilitar a todos los que intervienen en el juicio la posibilidad de interrogar a sus autores sobre su confección y fiabilidad.

Existen pruebas periciales que, una vez demostrado que se han obtenido cumpliendo a plena satisfacción los requisitos legales necesarios, poseen una aceptación general y son determinantes para el resultado de la sentencia. Una de ellas es la prueba dactiloscópica, emitida por el equipo científico de la policía. En otros supuestos, los informes aducidos por distintos peritos (propuestos por las partes litigantes) arrojan conclusiones discrepantes y hasta contradictorias. Cuando eso ocurre, y una vez practicadas las oportunas ratificaciones o aclaraciones en el interrogatorio de los peritos por las partes, queda al criterio del juez la decisión de tener o no en cuenta los informes. Un caso reciente de este último tipo es el proceso motivado por el tristemente famoso *envenenamiento por aceite de colza*: es poco probable que nunca se hayan aportado a un proceso español mayor cantidad de informes elaborados por tantos investigadores destacados y con las más refinadas técnicas analíticas,e igualmente improbable que este tipo de prueba haya tenido un coste más alto; los resultados de todo este esfuerzo fueron inconcluyentes y bastante decepcionantes.

Podríamos resumir en cinco apartados el tipo ele pruebas científicas esgrimidas hasta la fecha en España: prueba dactiloscópica, prueba de identificación por ADN, pruebas sobre paternidad, informes psiquiátricos, pruebas sobre la naturaleza de sustancias tóxicas y pruebas osteológicas. La prueba dactiloscópica, relativa al examen de las huellas dactilares encontradas en objetos relacionados con el delito, viene realizada por la policía judicial: suele aceptarse su informe. La prueba de restos de ADN encontrados en ropa, cabello, sangre. semen, etcétera, se tramita a través de laboratorios extranjeros y su aplicación no está asentada en nuestro país. Las pruebas para determinar la paternidad cuestionada se realizan en laboratorios médicos a instancia de parte y a través de la orden judicial. Los informes psiquiátricos se suelen llevar a cabo por especialistas en clínica forense de la Audiencia Provincial con el fin de determinar el grado ele imputabilidad del delincuente, los atenuantes y los eximentes: suelen ser objeto de bastante discusión. Las pruebas sobre la naturaleza de sustancias decomisadas para determinar su carácter tóxico corresponden a los laboratorios policiales; son reclamadas cuando se trata de atentados contra la: salud pública y suelen aceptarse sus resultados. Existe, por último, la prueba que, partiendo del examen de huesos o muelas hallados, permite inferir la identidad de la víctima; esta técnica se viene empleando en un número creciente de casos; el examen se realiza en laboratorios españoles. (Jordi Calvo.)

El problema de los neutrinos solares

Observaciones tenaces y pacientes indican que el Sol no emite estas esquivas partículas en la cuantía predicha por las teorías. Esa discrepancia pone en cuestión las explicaciones aceptadas de la física y de la luminosidad solar

John N. Bahcall

Además de luz y calor, el Sol radia grandes cantidades de neutrinos, esquivas partículas subatómicas sin carga eléctrica, de masa casi nula, que se mueven a una velocidad próxima a la de la luz. Ni siquiera les afectan la fuerza nuclear fuerte, que mantiene unidos los núcleos de los átomos.

La observación de tales partículas constituye un reto formidable, dificultad que es, por sí misma, motivo de interés. Los neutrinos, al interaccionar muy débilmente con la materia, pueden emerger con plena libertad de lugares de otro modo inaccesibles e informarnos sobre ellos; uno de esos lugares es el centro del Sol. El mensaje que nos traen los neutrinos solares es desconcertante y polémico: algo falla en los modelos actuales del Sol, o en nuestra explicación de las leyes de la física. La resolución de ese misterio podría revelarnos nuevas claves para entender el brillo solar, la evolución de las estrellas y la relación fundamental, si existe, entre las fuerzas de la naturaleza.

El neutrino se presenta en tres tipos —o sabores— conocidos. El más corriente en los experimentos terrestres es el neutrino electrónico, que interacciona con los electrones. Los otros dos sabores —el neutrino muónico y el neutrino tauónico— interaccionan con parientes masivos y de vida corta del electrón: muones y partículas tau. Electrones, muones y partículas tau, junto con sus correspondientes neutrinos, se inscriben entre las partículas fundamentales, elementos básicos de los que está formado el universo.

Los neutrinos solares no pueden retenerse para su estudio; la mayoría de ellos atraviesa directamente la Tierra. Ocasionalmente, sin embargo, un neutrino interacciona con un átomo de manera observable. Desde 1968 hasta 1986, el único detector de neutrinos solares del mundo fue una elegante instalación experimental alojada en la mina de oro de Homestake, en Lead (Dakota del Sur), y dirigida por Raymond Davis, Jr., entonces en el laboratorio nacional Brookhaven y hoy en la Universidad de Pennsylvania. Davis llenó un gran tanque con percloroetileno, un fluido para limpiar que contiene cloro. Un neutrino puede interaccionar con el cloro 37 (isótopo estable que constituye una cuarta parte del cloro terrestre), convirtiendo uno de los neutrones de su núcleo en un protón, con lo que pasa a ser argón 37 (isótopo radiactivo del gas inerte). Cada pocos meses Davis vaciaba el tanque, separaba químicamente los átomos de argón y los contaba a partir de su radiactividad, a fin de estimar el flujo de neutrinos que habían atravesado el tanque.

El número de reacciones desencadenadas por los neutrinos solares era tan bajo que se definió una nueva unidad para expresarlo: la unidad de neutrino solar UNS (o SNU, del inglés "solar neutrino unit"), igual a un suceso por segundo por cada 10^{36} átomos del blanco. Las teorías estándar de las reacciones nucleares que se desarrollan en el Sol predicen que un detector de cloro 37 debería registrar un flujo de 7,9 ± 2,6 UNS, donde los errores describen la incertidumbre teórica total.

Desde el mismo comienzo casi de la instalación experimental del cloro 37 se apreció que el el flujo observado era bajo. Al principio, las discrepancias podían atribuirse de manera plausible a imprecisiones teóricas y experimentales. Tras 18 años de refinar los cálculos teóricos y los datos experimentales, la discrepancia permanece y ya supera el margen de imprecisión. Davis y sus colaboradores infieren que el flujo de neutrinos solares es de 2,1 ± 0,3 UNS.

Una segunda instalación experimental, realizada en Kamioka (Japón) y conocida por Kamiokande II, se halla desde 1986 dedicada a la caza de neutrinos solares. Se sigue allí un método de detección distinto: busca los electrones que el paso de los neutrinos ha hecho saltar de las moléculas de agua. Las mediciones de Kamiokande II son coherentes con los resultados de Davis. El misterio de

JOHN N. BAHCALL es profesor del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton (Nueva Jersey) donde reside desde 1971. Se doctoró en física por la Universidad de Harvard en 1961. Con Raymond Davis, Jr., de la Universidad de Pennsylvania, publicó en 1964 varios trabajos en los que demostraba la viabilidad de un detector de neutrinos solares de cloro. Bahcall investiga también en modelos de galaxias, materia oscura, estrellas de neutrones y cuásares.

1. COLABORACION INTERNACIONAL para solucionar el problema de los neutrinos solares expresada en el denominado "Experimento de galio soviético-norteamericano" (SAGE). En esa instalación soviética, los físicos buscarán neutrinos producidos por las reacciones nucleares básicas del interior solar. La luz visible revela sólo información acerca de las complicadas regiones exteriores del Sol; los neutrinos atraviesan el interior como si fuese transparente. Estas partículas ofrecen una visión única de las condiciones reinantes en el interior solar y sirven de banco de pruebas de las teorías físicas en vigor.

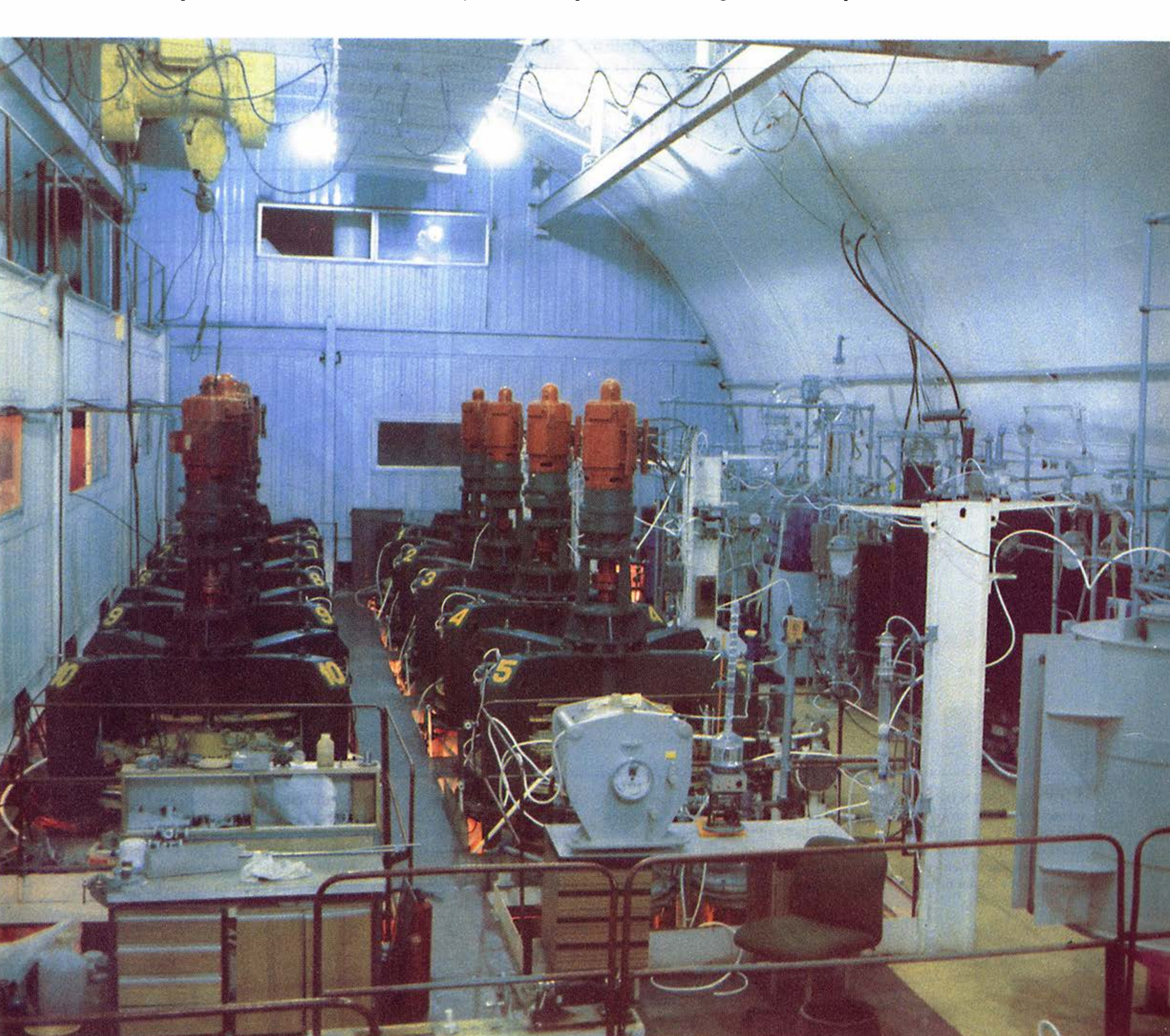
los neutrinos "perdidos" es otra manera de referirse al problema de los neutrinos solares.

El problema de los neutrinos preocupa sobre todo a los astrónomos empeñados en conocer los procesos en virtud de los cuales brillan el Sol y las demás estrellas. Las capas exteriores del Sol sufren la acción de la convección, la turbulencia, la rotación y los campos magnéticos, que complican los procesos que tienen lugar en esas regiones y dificultan su comprensión. Los neutrinos se generan en las profundidades del núcleo solar, cuyas condiciones reinantes tendrían que ser mucho más fáciles de calcular.

A grandes rasgos, todos los modelos solares postulan que el Sol brilla a causa de la fusión nuclear; en ésta, los núcleos de hidrógeno (protones) se fusionan para formar núcleos de helio, también llamados partículas alfa (dos protones y dos neutrones ligados entre sí). Unos 600 millones de toneladas de hidrógeno solar se consumen en este proceso cada segundo. Este conjunto de reacciones, así se cree, proporcionan la energía a las estrellas estables como el Sol y a las de masa menor. Se denomina cadena PP porque se inicia con la fusión de dos protones. De la cadena PP resulta que cuatro protones se convierten en una partícula alfa, dos positrones (la réplica en antimateria de los electrones), dos neutrinos electrónicos y unos 25 millones de electronvolt de energía. (Un fotón de luz visible tiene una energía de unos dos electronvolt.)

La mayoría de los neutrinos solares se genera en la primera reacción de la cadena PP, la reacción PP (protón-protón); en ella un protón se desintegra en un neutrón en la inmediata vecindad de otro protón; las dos partículas forman una variedad pesada del hidrógeno llamada deuterio, junto con un positrón y un neutrino. Las energías de los neutrinos producidos en esta reacción no sobrepasan los 420.000 electronvolt. El neutrino de menor energía que puede detectarse con el experimento de Davis viene determinado por la energía necesaria para convertir cloro 37 en argón 37, aproximadamente unos 814.000 electronvolt. Kamiokande II tiene un umbral aún más alto, unos 7,5 millones de electronvolt.

En otra reacción solar que genera neutrinos se ven implicadas tres partículas —dos protones y un electrón— y se produce deuterio y un neutrino. Se les conoce por neutrinos PEP (protón-electrón-protón). La probabilidad de que ocurra esta reacción es



230 veces menor que la de la reacción PP; ahora bien, los neutrinos PEP tienen una energía de 1,442 millones de electronvolt y pueden observarse mediante el detector de cloro 37, aunque con un rendimiento bajo.

El núcleo de deuterio producido por cualquiera de estas reacciones se fusiona con otro protón para formar helio 3 (que contiene dos protones y un neutrón) y un rayo gamma. Por lo común —el 85 por ciento de las veces, según los modelos estándar—, el ciclo de la reacción se completa cuando dos núcleos de helio 3 se fusionan y crean una partícula alfa y dos protones sobrantes que retornan al inicio del ciclo. En este proceso no se generan más neutrinos. Aproximadamente el 15 por ciento de las veces, sin embargo, el helio 3 se fusiona con una partícula alfa, produciendo berilio 7 y un rayo gamma; el berilio 7 absorbe entonces un electrón, se transforma en litio 7 y emite un neutrino. El 90 por ciento de estos neutrinos tienen una energía de 861.000 electronvolt, apenas suficiente para dejar su huella en el experimento del cloro 37.

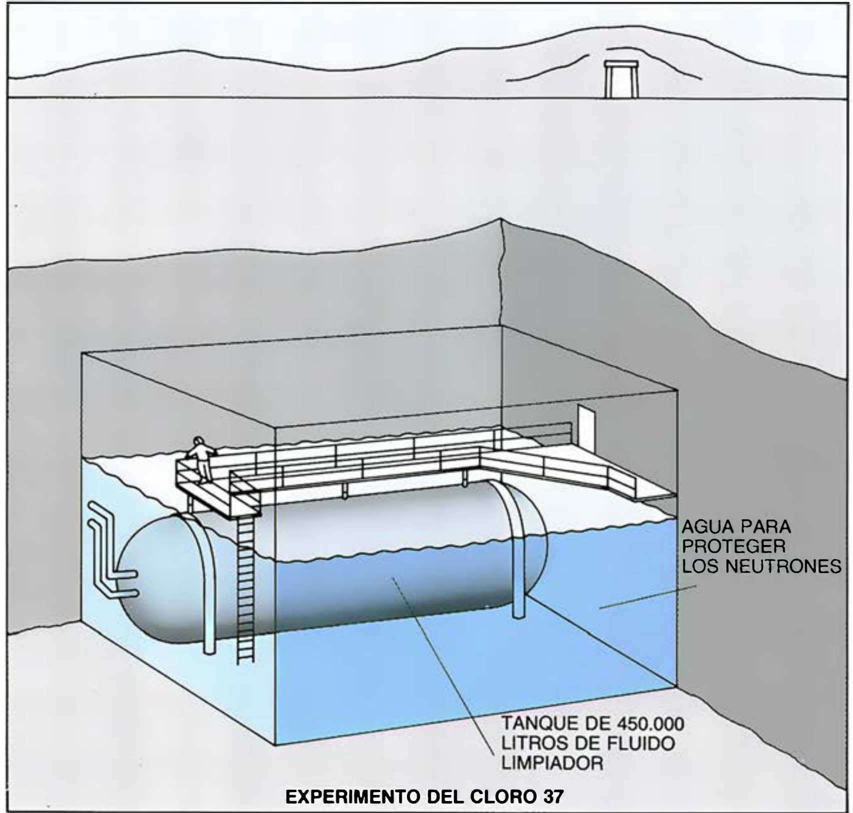
En contadas ocasiones —una vez más o menos por cada 5000 ciclos completos de la cadena PP —el berilio 7 se fusiona con un protón para formar boro 8 radiactivo, que acaba por desintegrarse en dos partículas alfa, un positrón y un neutrino energético. Estos neutrinos alcanzan energías de hasta 15 millones de electronvolt; de acuerdo con los cálculos, la desintegración del boro 8 es responsable de la mayoría de neutrinos detectados.

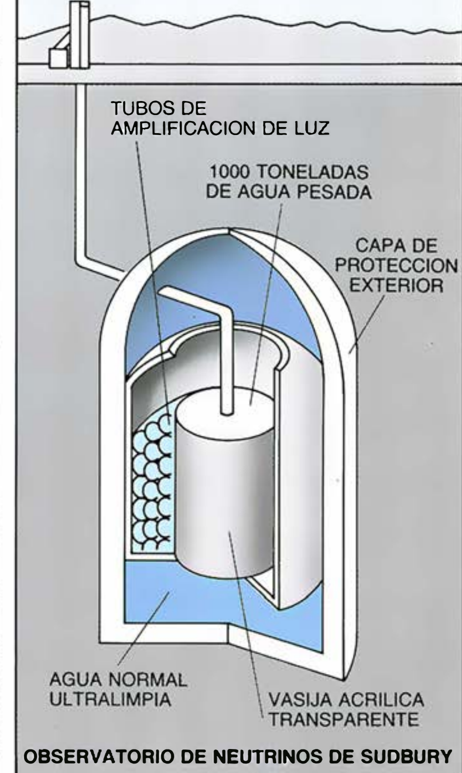
En el interior solar, el núcleo de helio 3 se fusiona con un protón libre para formar una partícula alfa, un positrón y un neutrino. Los neutrinos HEP (helio-protón) resultantes tienen energías de hasta 18,77 millones de electronvolt; se trata, empero, de una reacción rarísima —1000 veces menos probable que la del boro 8— que apenas incide en el recuento de neutrinos en los detectores existentes.

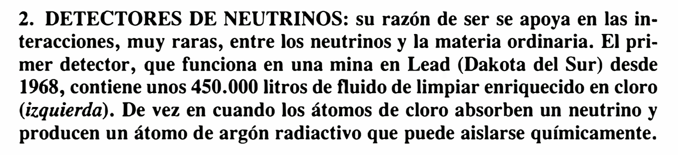
La teoría que predice estas reacciones, bien conocida, goza de autocoherencia interna. Sin embargo, el flujo observado de neutrinos solares no se corresponde con el esperado de este conjunto de reacciones.

¿Cabría la posibilidad que el problema de los neutrinos solares se debiera a algún error del modelo estándar del Sol? En principio, ese modelo puede ser muy preciso, ya que los astrónomos conocen con gran exactitud la masa del Sol, su luminosidad, su edad y la composición química de su superficie. Además, se trata de una estrella tranquila, de edad mediana que aún se encuentra en su estado de evolución más sencillo.

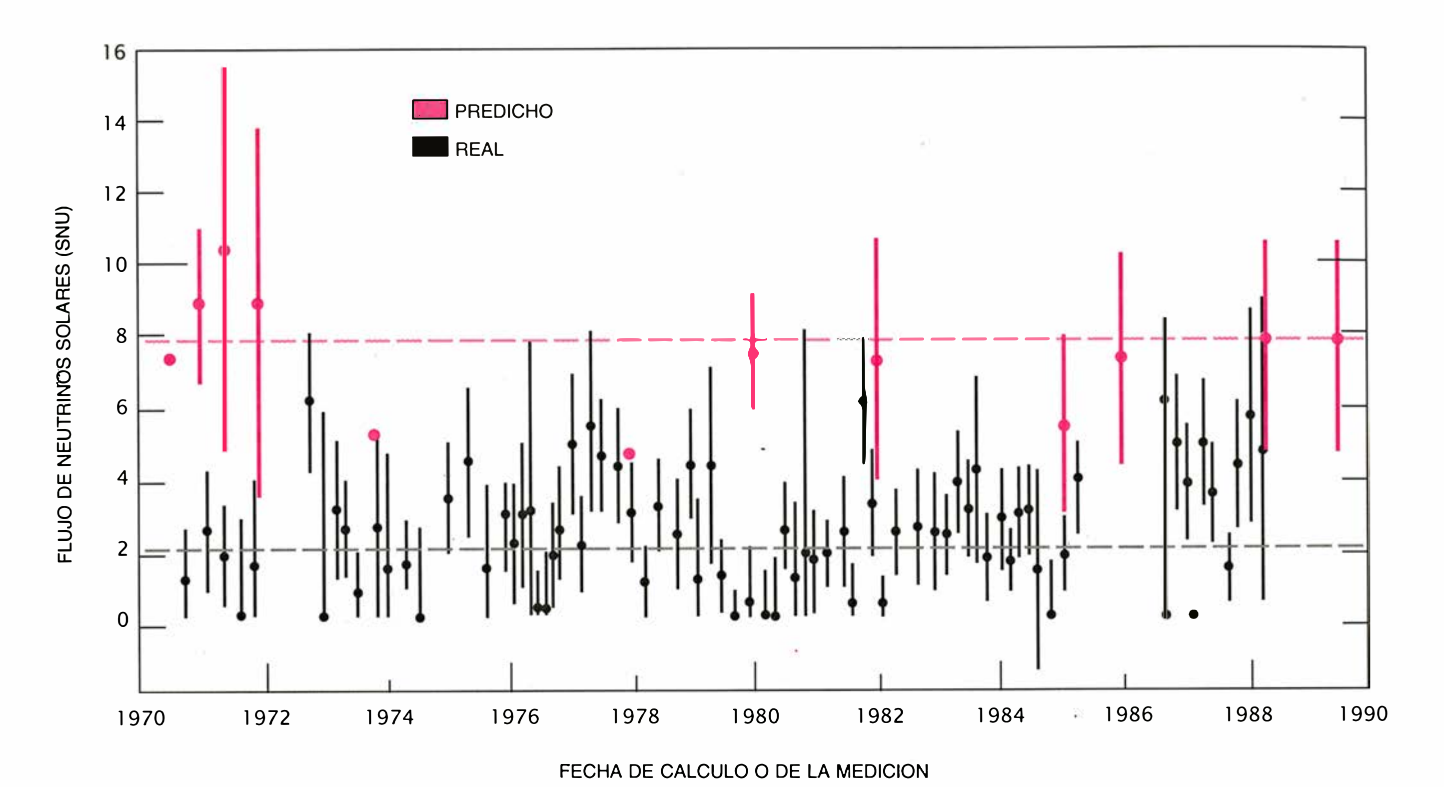
El modelo estándar del Sol se basa en varias hipótesis plausibles que se sustentan sobre abundantes datos observacionales. Se supone que el Sol ha evolucionado sin grandes desviaciones del equilibrio desde su nacimiento. Las reacciones nucleares antes descritas poseen la energía suficiente para alimentar la luminosidad del Sol durante cinco mil millones de años, la edad del sistema solar. La presión térmica y el flujo emitido de radiación debe equilibrar exactamente la fuerza atractiva de la potente gravedad solar; si así no fuera, el Sol se colapsaría (o se expandiría) en menos de una hora. Se supone que el Sol tenía una composición química uniforme cuando se formó. Durante mi-







2. DETECTORES DE NEUTRINOS: su razón de ser se apoya en las interacciones, muy raras, entre los neutrinos y la materia ordinaria. El primer detector, que funciona en una mina en Lead (Dakota del Sur) desde 1968, contiene unos 450.000 litros de fluido de limpiar enriquecido en cloro (*izquierda*). De vez en cuando los átomos de cloro absorben un neutrino y producen un átomo de argón radiactivo que puede aislarse químicamente. El nuevo Observatorio de Neutrinos de Sudbury (*derecha*), en Ontario, almacenará 1000 toneladas de agua pesada (que contiene deuterio, hidrógeno con un neutrón). Un neutrino puede colisionar con un electrón en el agua y producir un destello de radiación, o con un núcleo de deuterio y romperlo en un protón y un neutrón. El deuterio puede también absorber un neutrino, y dar origen a dos protones y un positrón (un antielectrón).



3. CALCULOS PREVISTOS Y MEDICIONES REALES de los flujos de neutrinos solares. Mantienen su mutuo desacuerdo desde hace veinte años. Los flujos se miden en unidades de neutrinos solares (UNS): una interacción de neutrino por cada 10^{36} átomos por segundo. Las mediciones del detector de cloro de neutrinos (*líneas negras*) arrojan un flujo global de neutrinos solares de 2,1 ± 0,3 UNS (*línea negra de trazos*), aunque hay indicios de que el número puede variar con el tiempo. Los cálculos teóricos realizados desde 1970 (*líneas rojas*) han predicho de forma coherente un flujo de 7,9 ± 2,6 UNS (*línea roja de trazos*). Ni siquiera en los extremos de los intervalos de error se solapan los dos valores. Por tanto, o hay algún proceso en particular que impide la detección de los neutrinos, o bien el proceso que hace brillar el Sol difiere del que le atribuyen los modelos teóricos actuales.

lenios, las reacciones nucleares desarrolladas en el núcleo han consumido hidrógeno y producido helio. Las capas externas no parecen mezclarse con el núcleo, por cuya razón se cree que aún mantienen la composición inicial aproximada del Sol.

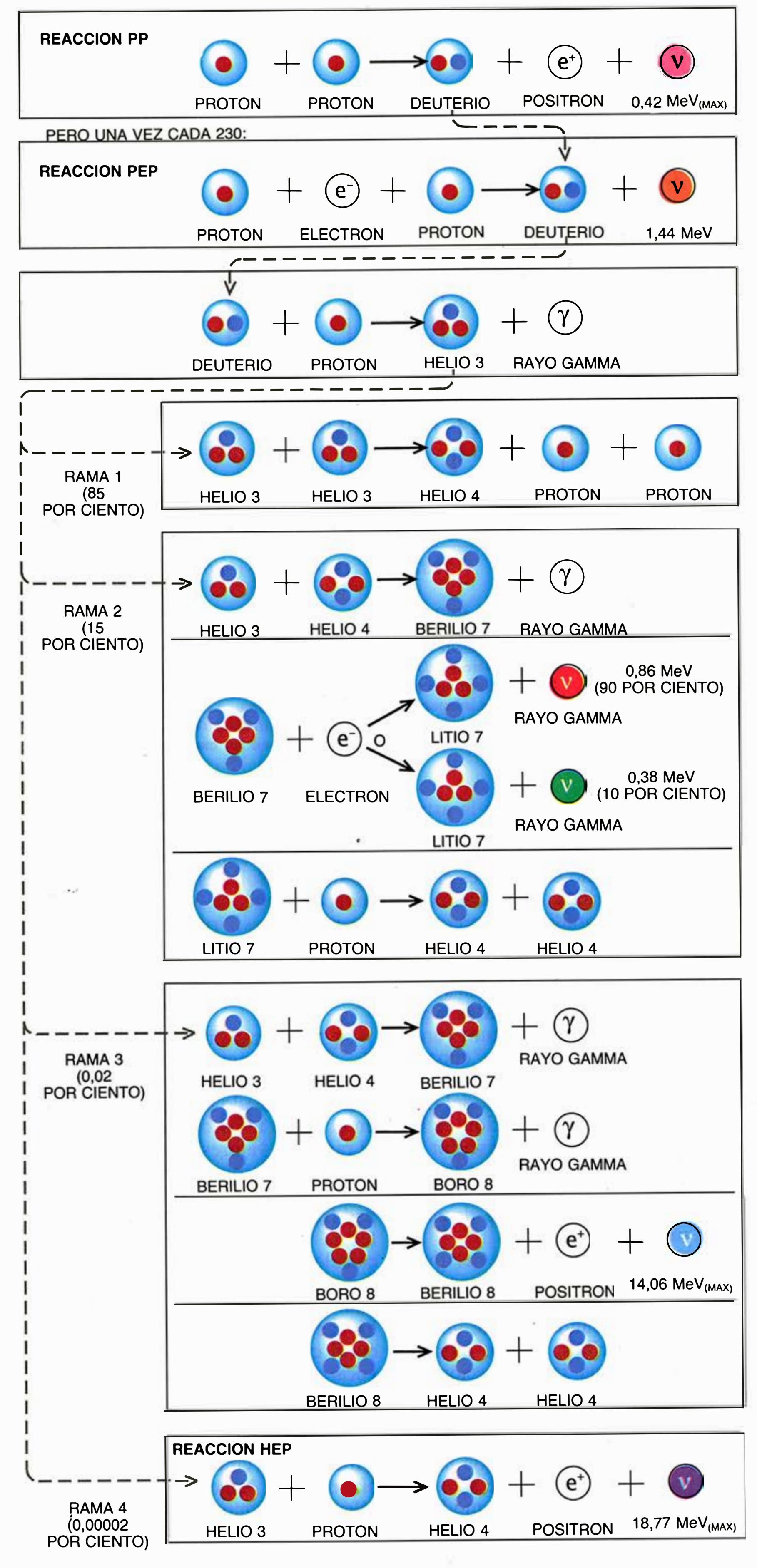
El modelo estándar explica la relación entre la luminosidad, la masa y la temperatura en el Sol y en estrellas que difieren, en lo tocante a luminosidad, hasta en un factor 100 millones. Las oscilaciones acústicas de la superficie del Sol han servido, de unos años a esta parte, para investigar su estructura interna; las frecuencias de las oscilaciones calculadas a partir del modelo estándar concuerdan con los miles de valores observados con una aproximación mejor de un uno por ciento. El mayor hito del modelo solar, por impresionante, suele pasar inadvertido: los astrónomos usan esa teoría de manera rutinaria para interpretar las observaciones de las composiciones física y química de las estrellas en toda clase de entornos, desde la vecindad solar hasta las galaxias remotas, sin contradicciones aparentes. Por tanto, cualquier modificación del modelo solar tendría profundas consecuencias en la astronomía. La única señal directa de las reacciones nucleares estelares predichas por el modelo estándar es el flujo solar de neutrinos. El problema estriba en que la predicción parece incorrecta.

Alguien podría aducir cuán difícil resulta calcular las condiciones reinantes en el centro del Sol. Mas, a pesar de la elevada temperatura (unos 15 millones de Kelvin) y la enorme densidad (150 gramos por centímetro cúbico, 13 veces la densidad del plomo), se confía en la aplicación de las leyes de los gases para describir el centro del Sol, introduciendo sólo pequeñas correcciones que no alteran significativamente los flujos de neutrinos predichos.

La fiabilidad del cálculo del flujo de neutrinos solares se ve ensombrecida por la composición, desconocida, del interior profundo, donde se generan los neutrinos. Varios autores han señalado que la producción de neutrinos solares es sensible a la composición química del interior y han propuesto modelos según los cuales el Sol nació con una composición interna bastante distinta de la de su exterior visible. Ninguno de tales modelos ha logrado explicar todas las características observadas del Sol. Además, varios modelos de evolución estándar del Sol, resultado del trabajo independiente de varios equipos de investigadores, predicen flujos de neutrinos idénticos hasta en un 10 por ciento, siempre que se utilicen los mismos parámetros de entrada.

¿Y si fueran erróneos los flujos de neutrinos calculados? El margen de error en el flujo de neutrinos solares calculado se estima basándose en el rango teórico total; es decir, en el rango de valores en que se mueven los cálculos plausibles publicados. Este método no garantiza la inmunidad frente a un error conceptual de la teoría sobre la que se apoyan estos cálculos, pero ese modo de estimar el error goza de simplicidad y objetividad. En la práctica, el verdadero valor caerá fuera del rango teórico total en el caso exclusivo de que se equivocara alguno de los que determinaron un parámetro de entrada.

Entre 1963 y 1988, el autor y sus colaboradores (en particular, Roger K. Ulrich, de la Universidad de California en Los Angeles) publicaron 19 cálculos de ritmos de sucesos de neu-



trinos en un experimento de cloro 37. De estos cálculos, los 11 publicados desde 1970 son coherentes con un ritmo de 7,9 ± 2,6 unidades de neutrinos solares indicado antes.

¿Podría el error experimental explicar el problema de los neutrinos solares? La instalación experimental del cloro 37 está ubicada bajo tierra a fin de proteger el dispositivo de la radiación cósmica de fondo, capaz de provocar señales espúreas. Los átomos de argón 37 producidos en el tanque se extraen con un rendimiento superior al 90 por ciento; se registran mediante contadores electrónicos muy sensibles que detectan la desintegración radiactiva de incluso un átomo por mes.

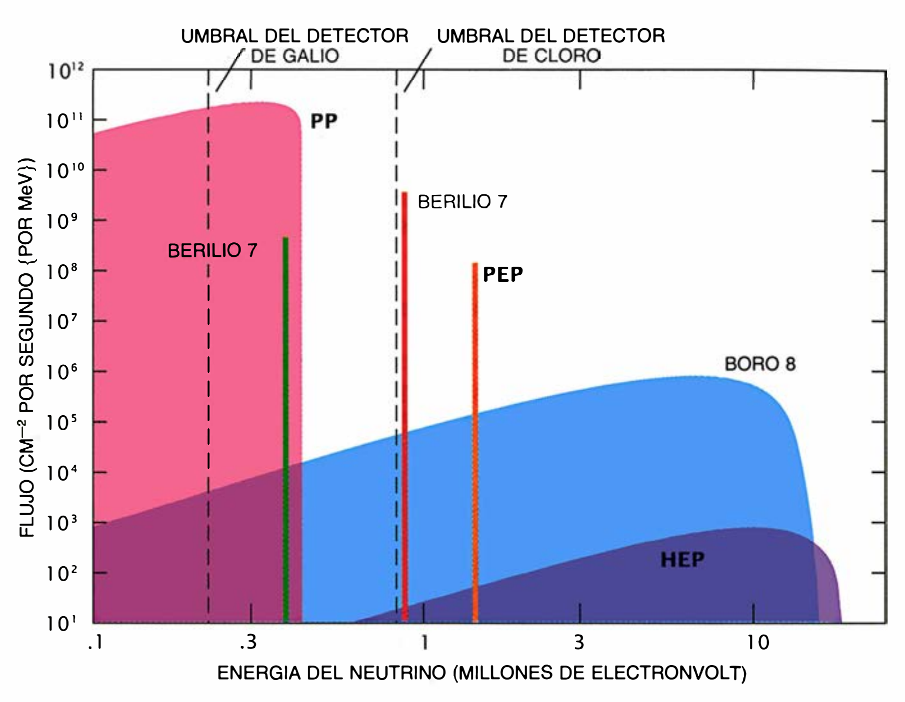
Davis ha acumulado y analizado datos de flujos de neutrinos durante 18 años que indican un ritmo medio de producción de argón 37 de 0,46 ± 0,04 átomos por día. Restando el fondo y considerando el rendimiento con que el cloro 37 interacciona con los neutrinos, se llega al problemático flujo de 2,1 ± 0,3 UNS. Los números reflejan un nivel de confianza del 68 por ciento, lo que significa que hay un 32 por ciento de probabilidades de que el verdadero valor caiga fuera del margen de error señalado. Nueve tomas de datos recientes, hechas entre 1986 y 1988, abonan un flujo de neutrinos solares de 3,2 ± 0,7 UNS, muy por debajo del flujo predicho, aunque posiblemente indicativo de un aumento real.

La instalación experimental de Kamiokande II detecta la radiación de Cerenkov (algo análogo en óptica a "romper la barrera del sonido") que emiten los electrones acelerados a velocidades próximas a la de la luz cuando interaccionan con neutrinos energéticos. El detector Kamiokande se diseñó originalmente para observar la postulada desintegración del protón. A finales de 1984, un equipo de la

4. CADENA PROTON-PROTON de reacciones nucleares; se cree que proporciona más del 98 por ciento de la energía solar. La reacción inicial protón-protón produce la mayoría de los neutrinos solares; éstos carecen de energía suficiente para dejarse observar en el detector de cloro, pero deberían ponerse de manifiesto con los nuevos detectores de galio. Se supone que los neutrinos energéticos del boro 8 dominan entre los neutrinos solares que se detectan en el experimento del cloro. Los aún más energéticos neutrinos del helio-protón (HEP) son tan raros, que sólo aportan una contribución despreciable al flujo medido. La frecuencia relativa de estas reacciones se basa en inferencias relativas a las condiciones del interior solar. Si tales inferencias están equivocadas, las predicciones del flujo de neutrinos pueden resultar también incorrectas.

Universidad de Pennsylvania, dirigido por Eugene W. Beier y Alfred K. Mann, ayudaron a sus colegas japoneses, bajo la dirección de Masatoshi Koshiba y Yoji Totsuka, de la Universidad de Tokio, a remodelar el detector para poder detectar los sucesos menos energéticos que producen los neutrinos solares. Por suerte la conversión se acabó a finales de 1986, justo unos meses antes de la explosión de la brillante supernova de febrero de 1987. Kamiokande II detectó neutrinos de la supernova, encontrándose que concordaban con las teorías actuales de la física que rige estos violentos sucesos.

Las interacciones neutrino-electrón dispersan los electrones hacia delante y proporcionan alguna indicación de la dirección de la fuente del flujo de neutrinos. Kamiokande II ha encontrado que los electrones se dispersan preferentemente según la dirección del eje Tierra-Sol, confirmando la realidad del origen solar de los neutrinos. Las medidas preliminares del flujo de neutrinos del detector Kamiokande se muestran de acuerdo con el experimento del cloro 37, que aproximadamente representan el 0,39 del valor esperado a partir del modelo solar estándar. Tomados en conjunto, los dos experimentos proporcionan una prueba sólida de que existe un déficit real de neutrinos solares.



5. ESPECTRO DE ENERGIA de los neutrinos producidos por las reacciones nucleares en el Sol (*véase la figura 4*), según se infiere de las teorías estándar de la física de neutrinos. Las líneas de trazos indican los umbrales de detección de los experimentos de galio y de cloro. El espectro real de energía puede determinarse utilizando, entre otros detectores, el observatorio canadiense instalado en Sudbury, que mide absorciones individuales de neutrinos; si las formas de las curvas difieren significativamente de las que se representan en la figura, deberán modificarse las teorías estándar.

Una posible explicación del déficit de neutrinos es que el Sol esté atravesando una calma transitoria en su actividad y que la teoría se confirmara para la producción total de neutrinos durante períodos largos. Al objeto de comprobar esta posibilidad, George A. Cowan, del Laboratorio Nacional de los Alamos, y Wick C. Haxton, actualmente en la Universidad de Washington en Seattle, propusieron un experimento para medir la variabilidad temporal del flujo de neutrinos. Los neutrinos solares que atraviesan la Tierra de vez en cuando reaccionan con átomos de molibdeno, un elemento raro, dando un electrón y un isótopo radiactivo del elemento tecnecio; este isótopo se desintegra gradualmente, pero el bombardeo de neutrinos lo repone de forma continua. Sólo los neutrinos solares dotados de energía, tales como los generados en el proceso del boro 8, son capaces de producir esta reacción.

El tecnecio radiactivo tiene un periodo de semidesintegración de 4,2 millones de años. Su concentración actual refleja su ritmo total de producción durante los últimos millones de años y, por tanto, la intensidad del flujo de neutrinos solares en las épocas pasadas. Un equipo de investigación encabezado por Kurt Wolfsberg, de Los Alamos, medirá la concentración de tecnecio radiactivo en rocas inalteradas de la mina de molibdeno Henderson, a 1800 metros de profundidad, en Clear Creek County (estado de Colorado).

El modelo solar estándar predice que el comportamiento solar no cambia a lo largo de un intervalo de pocos millones de años, de manera que el flujo de neutrinos promediado en el tiempo del experimento del tecnecio debería concordar con las medidas actuales del flujo. Si así fuera, entonces el bajo flujo de neutrinos del Sol no sería un fenómeno temporal. Pero si el nivel histórico se ajusta a las predicciones del experimento, más altas, la hipótesis actual de una constancia extrema del comportamiento solar debe ser errónea. Quedará todavía algún cabo suelto, pues no acabamos de conocer con exactitud el nivel de radiación de fondo ni el ritmo de producción del tecnecio.

Un dato clave, todavía por conocer, es el relativo a la cuantía de neutrinos solares de baja energía que se producen en la reacción PP primaria; cifra que no puede determinarse por los experimentos del cloro 37 o Kamiokande II. Dos nuevos observatorios de neutrinos que emplean detectores de galio 71 explorarán este intervalo de energías. Cuando el galio 71 absorbe un neutrino, resulta un electrón y un átomo de germanio 71 radiactivo; los átomos de germanio pueden separarse químicamente del galio; la cantidad de germanio 71 se determina contando las desintegraciones radiactivas.

La energía mínima que han de tener los neutrinos para desencadenar la reacción del galio 71 es de 233.000 electronvolt, muy por debajo de la energía máxima de los neutrinos generados por la importante reacción PP. Los cálculos basados en el modelo estándar del Sol y la física de las partículas elementales en vigor establecen que los neutrinos de la reacción PP deben dar cuenta aproximadamente de la mitad de los sucesos perceptibles por el detector de galio 71.

Hay ya detectores de neutrinos de galio que operan en la Unión Soviética y en Italia. El experimento soviético cuenta con colaboración norteamericana de Los Alamos y las universidades de Louisiana, Pennsylvania y Princeton; de ahí que se le conozca también por SAGE ("Soviet-American Gallium Experiment"). En este montaje se utilizan 60 toneladas de galio metálico y se ha instalado en las entrañas de un monte del norte del Cáucaso, en la Unión Soviética.

El experimento GALLEX, así se llama el organizado por Italia, cuenta con la participación de equipos téc-

nicos de Alemania Occidental, Francia, Italia, Israel y los EE.UU.; empleará un detector de 30 toneladas de galio en forma de cloruro de galio. El dispositivo se instalará en un laboratorio construido en el túnel del Gran Sasso, en la Italia central. El grupo GALLEX espera empezar las mediciones este año. La magnitud de estos dos experimentos es impresionante, si tenemos presente que, en el momento en que se desarrollaron las técnicas experimentales, la producción mundial total de galio rondaba apenas las 10 toneladas al año.

Los experimentos SAGE y GALLEX aplicarán diferentes métodos de extracción química, aunque poseerán parecidos contadores atómicos. La comparación de sus resultados sacará a la luz cualquier error sistemático. Para que el Sol siga brillando, las leyes actualmente aceptadas de la física de neutrinos demandan que el ritmo de sucesos observados en los experimentos con galio sea, por lo menos, el 60 por ciento del predicho por el modelo estándar, y ello con total independencia de las posibles alteraciones del modelo solar. Mas, si las leyes de la física se modificaran, podría ser distinto el ritmo de sucesos, sin superar quizás el 10 por ciento del valor estándar.

Hay en proyecto un nuevo y potente detector de neutrinos que sirva de continuación a los experimentos de galio. El pasado enero, los gobiernos de Canadá y EE.UU. aprobaron la financiación de un detector de 1000 toneladas de agua pesada (la que contiene deuterio en vez del hidrógeno ordinario); se colocará en una mina de níquel cerca de Sudbury, Ontario. El Observatorio de Neutrinos de Sudbury (ONS) es una iniciativa en la que colaboran científicos de Canadá, EE.UU. y el Reino Unido. Buscará electrones producidos por neutrinos que interaccionen con núcleos de deuterio y determinará la energía y dirección de estos electrones; registrará también la radiación de Cerenkov de las colisiones neutrino-electrón. El telescopio de neutrinos del ONS será sensible a los neutrinos del boro 8 y a los HEP, pero no podrá detectar neutrinos solares dotados de menor energía.

El ONS desempeñará las funciones de un detector con múltiples prestaciones. Estudiará las colisiones y las absorciones de neutrinos. La absorción ocurre sólo con neutrinos electrónicos; por contra, la colisión puede producirse con las tres variedades de neutrinos, aunque la probabilidad de que los neutrinos muónicos y tauónicos colisionen con un electrón es sólo de un séptimo con respecto a los neutrinos electrónicos. Se cree que los procesos nucleares que se desarrollan en el Sol crean sólo neutrinos electrónicos, pero algunos teóricos han sugerido que otros procesos físicos del interior solar hasta ahora no advertidos podrían transformar algunos de los neutrinos electrónicos en los de las otras variedades, que escaparían a la detección por parte del experimento del cloro 37. Más adelante nos ocuparemos de esta crisis de identidad de los neutrinos.

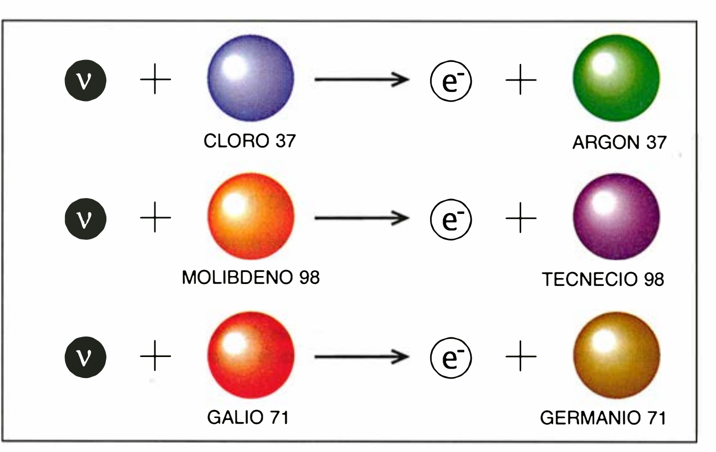
Hay un tipo de reacción en el detector de deuterio que es sensible por igual a las tres clases de neutrinos: el modo de corrientes neutras, en el que el neutrino descompone el núcleo de deuterio en el neutrón y el protón que lo forman. Esta reacción puede constituir la base de un "detector de igualdad de oportunidades" que evite los sesgos de los detectores de absorción de neutrinos (sensibles sólo a los neutrinos electrónicos) y de los detectores de colisión (sólo débilmente sensibles a los neutrinos electrónicos y

MINA DE HOMESTAKE (DAKOTA DEL SUR)

MINA DE MOLIBDENO DE HENDERSON (COLORADO)

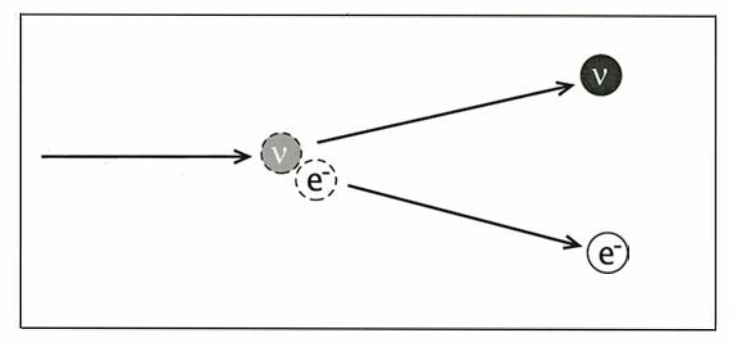
SAGE (U.R.S.S.)

GALLEX (ITALIA)

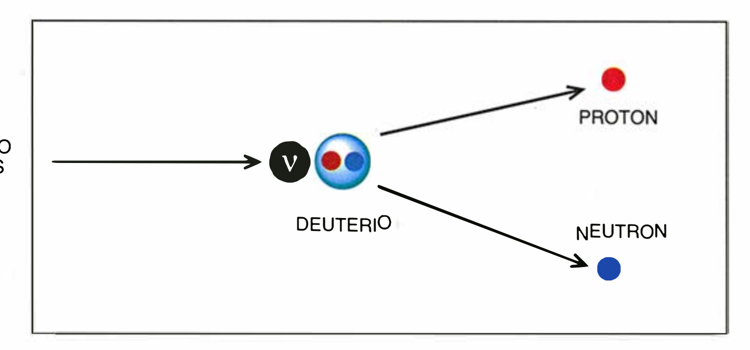


KAMIOKANDE II, (JAPON)

OBSERVATORIO DE NEUTRINOS DE SUDBURY (ONTARIO)



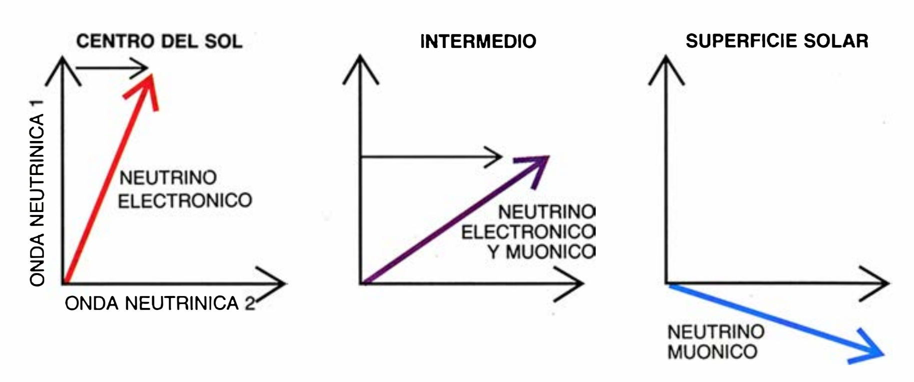
OBSERVATORIO DE NEUTRINOS DE SUDBURY



6. INTERACCIONES DE NEUTRINOS con la materia corriente: permiten el estudio de los neutrinos solares. Un neutrino absorbido por un núcleo atómico transforma un neutrón en un protón; el átomo se transforma en un elemento distinto y emite un electrón de alta velocidad (*arriba*). Los electrones chocan con los neutrinos; el movimiento del electrón sigue aproximadamente la trayectoria del neutrino entrante (*en medio*). Un núcleo de deuterio absorbe un neutrino y se rompe sin transferencia de carga eléctrica (*abajo*); esta reacción de corriente neutra puede ser provocada por clases de neutrinos que no se detectan fácilmente con otros métodos. (Diagramas de Andrew Christie.)

tauónicos). Comparando los resultados de un detector de igualdad de oportunidades con los obtenidos en experimentos más especializados se podría resolver el problema fundamental de si los neutrinos se transforman de una clase en otra.

Se está investigando el empleo de dispositivos de baja temperatura como posibles detectores de los neutrinos de baja energía producidos en la reacción básica PP del Sol. Se fundan en el principio según el cual un poco de energía puede tener un gran efecto a baja temperatura. Un grupo de la Universidad de Stanford está preparando un detector de silicio cristalino enfriado a temperaturas bajísimas (milikelvin) para registrar electrones dispersados de baja energía. Las dispersiones de neutrinos pueden provocar excitaciones observables en helio líquido ultrafrío, una posibilidad que se está investigando en la Universidad de Brown. Otros grupos están desarrollando un detector que utiliza indio 115, capacitado para absorber neutrinos a energías relativamente bajas. Una iniciativa internacional encabezada por Ramaswamys S. Raghavan, de los Laboratorios AT&T Bell, prepara el estudio de los neutrinos solares mediante detectores de boro que generarán destellos luminosos cuando los neutrinos produzcan electrones que se muevan con rapidez.



7. EFECTO MIKHEYEV-SMIRNOV-WOLFENSTEIN (MSW), que aporta una posible solución al problema de los neutrinos solares. Los neutrinos pueden comportarse como ondas materiales superpuestas (indicadas como dos vectores) que se mueven a velocidades distintas. Las condiciones en el Sol pueden desplazar las fases de las ondas, haciendo que un neutrino electrónico normal (*flecha inclinada verticalmente*) se comporte como un neutrino muónico (*flecha inclinada horizontalmente*).

¿Qué posibles soluciones del problema de los neutrinos solares aportarían estos nuevos detectores? Un conjunto de soluciones tiene por punto de mira la modificación del modelo solar estándar. Quizás —en contra de lo que se piensa actualmente— el núcleo del Sol es muy pobre en elementos más pesados que el hidrógeno; o, tal vez, por un proceso de mezcla en el Sol, los elementos pesados del núcleo se diluyen por toda la masa solar. La convección inestable en el astro podría provocar que éste se comportara de manera distinta de lo que se supone. Todas estas modificaciones rebajarían la temperatura interna estimada del Sol e implicarían una menor producción de neutrinos por el boro 8. Ninguno de esos modelos así corregidos satisface del todo la doctrina física aceptada, amén de recurrir a hipótesis *ad hoc* para explicar, sobre todo, los flujos de neutrinos observados.

Una solución fascinante que intenta resolver, de consuno, el problema de los neutrinos solares y el de la "masa oculta"de la cosmología, se la debemos a William H. Press, de la Universidad de Harvard, y David N. Spergel, de la Universidad de Princeton, y también, independientemente, a John Faulkner, de la Universidad de California en Santa Cruz, y Roland L. Gilliland, del Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas en Boulder (Colorado). Formulan la hipótesis según la cual una clase de partículas subatómicas, todavía por observar y que responden a la denominación de partículas masivas que interaccionan débilmente (PMID, o WIMP, de "Weakly Interacting Massive Particles"), creadas en grandes cantidades en el universo primitivo, dan cuenta de la cuantía ingente de masa invisible que parece existir en las macroestructuras cósmicas. Estas partículas podrían agruparse alrededor de objetos dotados de gran masa como el Sol; si tienen las propiedades adecuadas, las PMID podrían redistribuir el calor en el interior solar, reduciendo el flujo de neutrinos del boro 8 hasta los niveles detectados.

Cabe, asimismo, la posibilidad de que los modelos solares actuales sean correctos y caigan las limitaciones, o deficiencias, en el bando de las teorías físicas vigentes. Los flujos de neutrinos teóricamente esperados del Sol se calculan basándose en el "modelo estándar de las interacciones de partículas" elaborado por Sheldon L. Glashow, de la Universidad de Harvard, Steven Weinberg, de la de Texas en Austin, y Abdus Salam, del Centro Internacional de Física Teórica de Trieste, modelo que establece una descripción unificada de las fuerzas electromagnéticas y nucleares débiles. En la versión más sencilla del mismo, todas las masas de los neutrinos son exactamente cero, pero las extensiones de dicho modelo permiten un amplio rango de posibilidades para las masas de los neutrinos.

No se dispone todavía de una medición de las masas de los neutrinos que goce de aceptación general, aunque los argumentos cosmológicos sugieren que ninguno de los sabores de los neutrinos tiene una masa mayor que 80 electronvolt. Las masas predichas por las extensiones del modelo estándar son mucho menores, en el intervalo comprendido entre un electronvolt y una millonésima de electronvolt.

La medición de masas tan pequeñas es por ahora imposible en las instalaciones experimentales terrestres; podría, sin embargo, lograrse examinando los neutrinos solares. La masa de los neutrinos afectaría al modo de propagación de las partículas a grandes distancias, verbigracia, la que media entre la Tierra y el Sol. Las observaciones de los neutrinos solares pueden llegar a revelar una masa mínima, de solo una millonésima de electronvolt, y ofrecer así un método para someter a prueba nuevos modelos teóricos de la física.

Un neutrino con masa podría actuar a modo de un pequeño imán; podría ser que el campo magnético del Sol cambiara la dirección del espín de un neutrino al emerger éste del interior. No se detectaría en la Tierra un neutrino con el espín invertido. Esta solución, propuesta hace muchos años, acaban de desenterrarla científicos soviéticos a fin de explicar la sugerencia de una relación inversa entre la actividad solar y el flujo de neutrinos. En los momentos de alta actividad del Sol, aumenta el nivel de su magnetismo. El flujo de neutrinos solares parece haber disminuido durante el pico del ciclo anterior (1979-1980) para crecer después durante un tiempo de baja actividad (1986-1988). Esta solución supone que el neutrino

tiene un campo magnético mucho más intenso que lo que predicen las teorías estándar y que, según algunos cálculos, no se compagina con otros datos astronómicos.

Algunas extensiones de la teoría actual, conocida como teoría de gran unificación o GUT (de "Grand Unified Theories") buscan un marco común para describir las cuatro fuerzas de la naturaleza. En 1985 la comunidad de físicos se conmocionó con la propuesta de una elegante solución al problema de los neutrinos solares que era coherente con las predicciones de las masas de los neutrinos de las GUT, fruto del trabajo de Stanislav P. Mikheyev y Alexi Yu. Smirnov, de la Academia de Ciencias Soviética en Moscú; basábanse éstos en trabajos anteriores de Lincoln Wolfenstein, de la Universidad de Carnegie-Melon. A tenor de dicha solución, los neutrinos pueden oscilar entre las tres variedades, un fenómeno conocido como el efecto Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein (MSW).

El efecto MSW exige que por lo menos un neutrino posea masa no nula. En su propagación los neutrinos se comportan no sólo como partículas, sino también como ondas; una onda neutrínica puede considerarse superposición de dos o más estados con diferentes masas que se mueven a distintas velocidades. La fase de la onda puede cambiar a medida que los distintos estados de masa se van desacompasando, determinando que un neutrino electrónico parezca un neutrino de una variedad distinta.

En el interior del Sol, las interacciones entre los neutrinos electrónicos y los electrones densamente empaquetados podría alterar el equilibrio de estados de masa en la onda; el neutrino saldría del Sol con la apariencia de un pesado neutrino tauónico o muónico, que no se percibiría en el detector de cloro 37. Incluso en el vacío, la fase de las componentes de un neutrino electrónico puede cambiar y alterar así sus características. El flujo de neutrinos podría resultar mucho menor que el postulado por la teoría estándar, aun cuando los neutrinos se crearan en el centro del Sol a los ritmos predichos. Para que se produzca el efecto MSW, el más pesado de los neutrinos necesita una masa comprendida entre sólo 0,01 y 0,001 electronvolt.

Si el efecto MSW fuera la explicación correcta del problema de los neutrinos solares, entonces los neutrinos contendrían importantes claves para conocer a qué energía se unifican las cuatro fuerzas. Se la supone altísima: en torno a 10^{24} electronvolt. Aunque esta energía se encuentra muy lejos del alcance de los aceleradores de partículas terrestres, los científicos podrían explorarla ya en sus observaciones de neutrinos cuyas masas, pequeñísimas, se burlan a la medición. ¡Qué posibilidad más maravillosa y sobrecogedora sería!

Esta atrevida explicación del problema de los neutrinos solares admite una comprobación directa. Ambos tipos de modelos solares, los estándar y los no estándar, predicen que la forma del espectro de energías de los neutrinos solares se corresponde con los cálculos actuales, aunque el flujo total generado por cada clase de reacción nuclear pudiera ser distinto. La hipótesis MSW predice que la transformación de neutrinos electrónicos en otras variedades depende de la energía. Por tanto, el espectro de energías esperado diferiría del postulado por la predicción estándar; así, por ejemplo, el flujo de neutrinos PP podría ser mucho menor que lo que permiten las teorías corrientes. Los experimentos con galio podrían mostrar una gran merma de neutrinos, lo que evidenciaría que se está produciendo el efecto MSW.

Los experimentos que se acometerán en la próxima década podrían traer la solución del problema de los neutrinos solares, facilitarnos un conocimiento cabal del brillo y la evolución de las estrellas y quién sabe si, también, promover la creación de una teoría completa de la física y del comportamiento del esquivo neutrino. Si la naturaleza se mostrara dispuesta a colaborar, los experimentos de neutrinos allanarían el camino.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SOLAR NEUTRINOS: A SCIENTIFIC PUZZLE. John N. Bahcall y Raymond Davis, Jr., en *Science*, vol. 191, n.° 4224, págs. 264-267; 23 de enero de 1976.

THE CASE OF THE MISSING SOLAR NEUTRINOS. W. A. Fowler en *Science Underground*, American Institute of Physics Conference Proceedings n.° 96, enero de 1983.

REPORT ON THE STATUS OF SOLAR NEUTRINO EXPERIMENTS. R. Davis, Jr., en *Proceedings of the Seventh Workshop on Grand Unification*, ICOBAN, 1986. Dirigido por J. Arafune. World Scientific, 1987.

SOLAR NEUTRINOS: A FIELD IN TRANSITION. John N. Bahcall, Raymond Davis, Jr., y Lincoln Wolfenstein en *Nature*, vol. 334, n.° 6182, págs. 487-493; 11 de agosto de 1988.

NEUTRINO ASTROPHYSICS. John N. Bahcall. Cambridge University Press, 1989.

Inmunoterapia del cáncer

La terapia basada en la transferencia de células constituye una de las nuevas estrategias desarrolladas para estimular el potencial anticancerígeno innato del sistema inmune

Steven A. Rosenberg

En 1968 atendí, como cirujano residente de un hospital de Boston, a un hombre de 63 años, aquejado del característico dolor abdominal de los cálculos biliares. Participé en la operación que se le practicó para extirparle la vesícula, un caso que hubiese sido rutinario de no mediar un dato realmente excepcional.

Doce años antes, el mismo paciente había ingresado en el mismo hospital con un problema abdominal de signo distinto. Había sufrido una operación de cáncer de estómago y se le había extirpado el tumor, pero, como ocurre a menudo, el cáncer se había extendido al hígado, donde no podíamos hacer nada. El hombre fue enviado a su casa sin tratamiento, con una esperanza de vida de sólo unos meses. Sorprendentemente, cuando a los tres meses volvió al hospital para una revisión, su salud había mejorado. Y siguió mejorando, hasta que dejó de venir. No volvimos a tener noticias suyas hasta que, al cabo de más de una década, le operamos la vesícula. No encontramos entonces ni rastro de su cáncer. Había desaparecido.

La desaparición espontánea de un cáncer es uno de los acontecimientos más raros en medicina. Se le suele citar a menudo en prueba de que el sistema inmune –principal defensa natural del cuerpo contra virus y otros "invasores foráneos" (incluido el transplante de órganos)– puede luchar a veces contra el cáncer. Hechos como el descrito han contribuido a estimular en muchos investigadores, el autor entre ellos, el interés por la búsqueda de una inmunoterapia para el cáncer, esto es, un tratamiento que permita incrementar el potencial innato del sistema inmune para eliminar las células cancerosas. Las células cancerosas se caracterizan por su peligrosa capacidad para dividirse sin control y "escaparse" del tumor original para establecer focos de crecimiento (metástasis) en otros tejidos.

En los últimos diez años hemos desarrollado, en el norteamericano Instituto Nacional del Cáncer, inmunoterapias experimentales contra el cáncer. En algunos pacientes, cuyos tumores avanzados habían resistido otras terapias, nuestros tratamientos han conseguido una regresión del mal.

En mi laboratorio hemos concentrado todos los esfuerzos en la inmunoterapia adoptiva, una terapia basada en la transferencia de células. Extraemos células que participan en la defensa inmune de un paciente con cáncer, y las "educamos" para que reaccionen contra el cáncer, o estimulamos su propio potencial anticancerígeno. A continuación, las devolvemos al torrente sanguíneo. Junto con las células del sistema inmune, o independientemente, administramos también moléculas que desempeñan un papel importante en la respuesta inmune. Con estas moléculas, que pueden generarse masivamente gracias a las técnicas del ADN recombinante, pretendemos estimular directamente la actividad anticancerígena de las células del sistema inmune del cuerpo. Son varias las versiones de nuestros tratamientos que se utilizan en muchos centros hospitalarios; estamos investigando otras nuevas, que esperamos resulten más eficaces.

Quedan muchas dificultades por vencer. La inmunoterapia, compleja y costosa, no se halla exenta de efectos secundarios potencialmente importantes. A pesar de ello, la terapia basada en la transferencia celular y otras inmunoterapias contra el cáncer están ganándose un sitio junto a las tres técnicas tradicionales: cirugía para eliminar masas discretas, radiaciones para mermar o eliminar cánceres localizados que no son accesibles a la cirugía y quimioterapia (administración sistémica de drogas para destruir los desarrollos cancerosos por todo el cuerpo).

La necesidad de nuevos tratamientos es imperiosa. Solas o conjuntamente, la cirugía, las radiaciones y la quimioterapia curan el cáncer en casi la mitad de las personas que lo padecen. Pero la incidencia de cáncer y, por tanto, el número de muertes, sigue siendo alta. La enfermedad se produce en uno de cada cuatro individuos aproximadamente. En Estados Unidos y Europa, una de cada seis personas morirá de cáncer; sólo en 1988, el cáncer afectaba a más de 485.000 norteamericanos, más que todos los que murieron en la segunda guerra mundial y en la guerra de Vietnam juntos.

La inmunoterapia constituye un buen complemento de los tratamientos ya existentes. Ello se debe a una propiedad que comparte con la quimioterapia: la de poder administrarse por vía sistémica para combatir la metástasis. Mas no sólo eso. Por ser selectivo el sistema inmune –suele atacar de manera exclusiva a las células enfermas–, se pueden poner a punto inmunoterapias contra el cáncer más específicas que las quimioterapias,

STEVEN A. ROSENBERG es cirujano jefe en el Instituto Nacional del Cáncer. Inició su formación en la facultad de medicina de la Universidad Johns Hopkins, donde se graduó en 1963; se doctoró en biofísica, por la de Harvard, en 1968. Completó su período de cirujano residente en el Hospital Peter Bent Brigham, de Boston, antes de aceptar su actual puesto. Rosenberg es pionero en el desarrollo de estrategias biológicas para el tratamiento del cáncer, basadas en la utilización de sustancias producidas de forma natural por el propio cuerpo.

tratamientos que a menudo matan, sin apenas discriminar, toda célula que se divide.

La idea de combatir al cáncer desencadenando el potencial latente del propio sistema inmune del paciente no es nueva. A principios del siglo XX algunos médicos abordaron esta estrategia inyectando bacterias muertas en los pacientes. Otros investigadores, en un intento de activar una respuesta anticancerígena específica, inyectaron en los pacientes sus propias células cancerosas. Tales medidas tuvieron escaso éxito. Gracias, no obstante, al reciente desarrollo de la inmunología, el conocimiento del funcionamiento del sistema inmune ha mejorado bastante. Ello, junto con los progresos en ingeniería genética, ha fomentado la búsqueda de nuevas terapias.

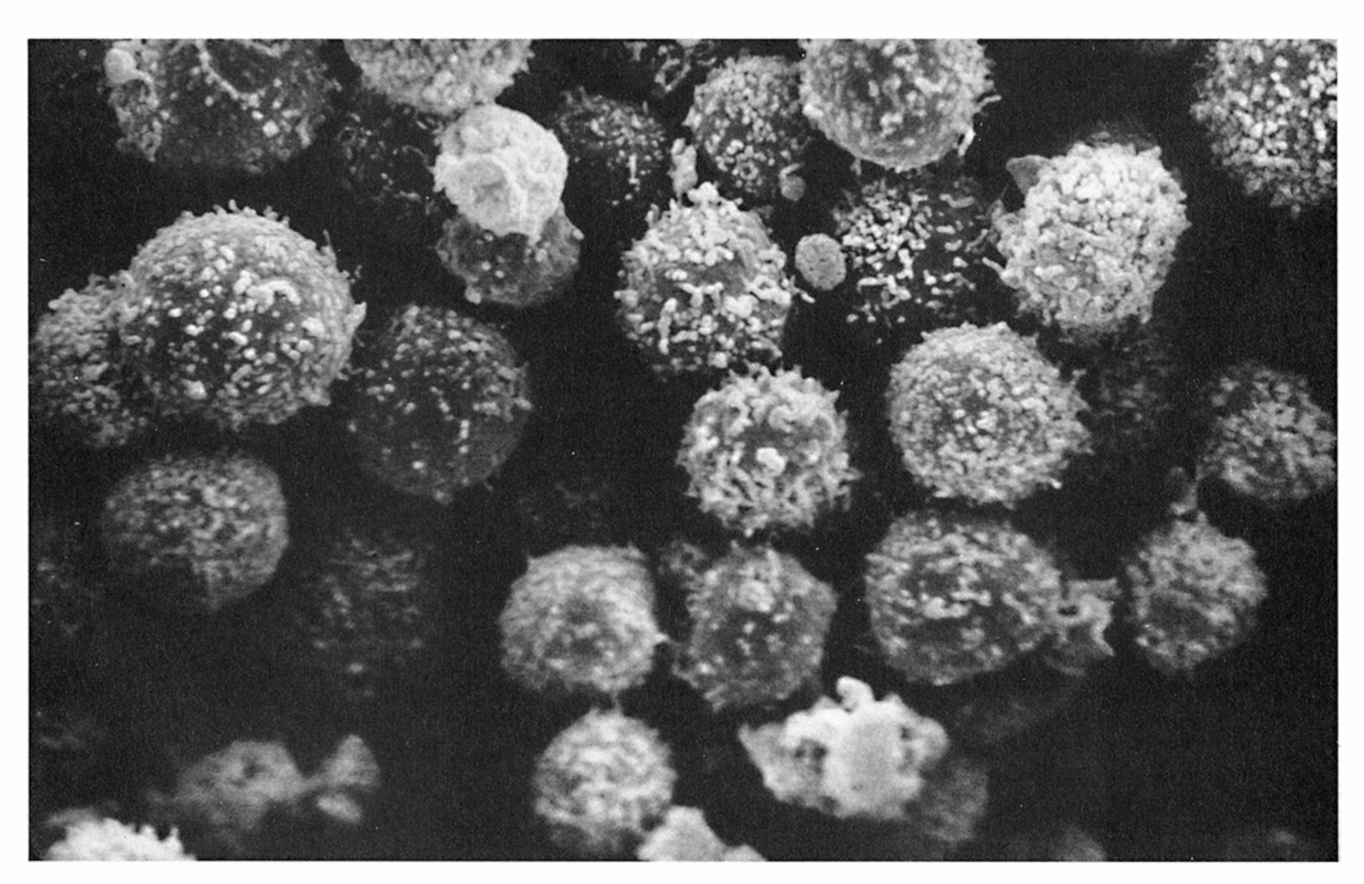
La respuesta inmune implica la acción integrada de un ejército de diferentes tipos celulares, entre los que se encuentran monocitos, macrófagos, eosinófilos, basófilos y linfocitos. Las células del sistema inmune distínguense de las de otros órganos en que no están en permanente contacto mutuo. Antes bien, circulan por todo el cuerpo, moviéndose con libertad dentro y fuera de los sistemas circulatorio y linfático.

Cada tipo de célula desempeña una función diferenciada, aunque pueden interaccionar entre ellas e incluso regularse unas a otras sus actividades. El comandante y también imprescindible soldado raso de este ejército es el linfocito. Hay dos subclases principales de linfocitos, las células *T* y las *B*; de su cuenta corre la especificidad de la respuesta inmune.

Las células *B* gobiernan la respuesta inmune humoral, o mediada por anticuerpos, que neutraliza a las bacterias y otros invasores. Cada célula *B* sólo es capaz de reconocer a un antígeno, molécula que identifica a una bacteria o a otro invasor como "foráneo". Las células *B* activadas secretan anticuerpos circulantes que se unen a los antígenos o a las dianas portadoras de antígenos, y los "marcan" para su posterior destrucción por otros componentes del sistema inmune.

Las células *T* dirigen la inmunidad mediada por células, esto es, la destrucción por parte de células del sistema inmune de los tejidos foráneos o células infectadas. Hay varios tipos de células *T*; entre ellas se encuentran las "coadyuvantes" y "supresoras", que modulan la respuesta inmune, y las citotóxicas (o "asesinas"), que pueden matar directamente las células anormales. Como las células *B*, las *T* portan también receptores para un solo antígeno. La célula *T*, una vez que reconoce y se une al antígeno situado sobre la superficie de otra célula, se activa, esto es, se multiplica y, si es citotóxica, mata a la célula con la que ha entrado en contacto. Las células cancerosas presentan a veces antígenos que no se encuentran en las sanas; por tanto, pueden potencialmente activar a las células *T* portadoras de receptores para tales antígenos.

Descubrimientos realizados en las décadas de los setenta y ochenta han puesto de manifiesto que las células del sistema inmune controlan sus actividades, a menudo entre sí, secretando pequeñas cantidades de citocinas, hormonas muy potentes. Estas recién identificadas proteínas, entre las que se encuentran las linfocinas (hormonas segregadas por los linfo-



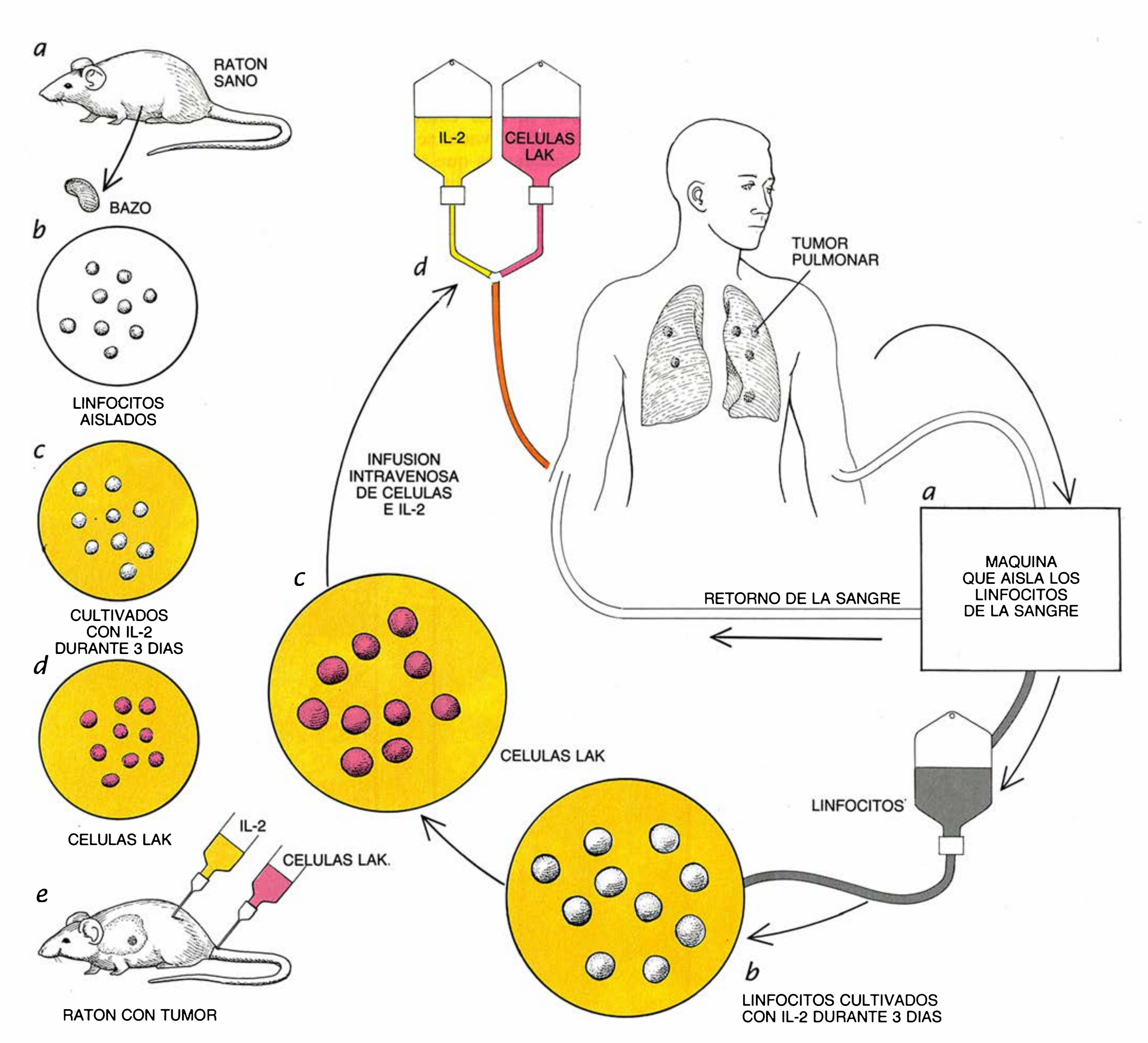
1. ELECTROMICROGRAFIA DE BARRIDO en la que se observan linfocitos *T* cultivados, procedentes del tumor de un paciente. Las células cultivadas, aunque parecen linfocitos corrientes, constituyen, en realidad, una nueva arma experimental contra el cáncer: los LIT o linfocitos que se infiltran en los tumores. Los LIT reconocen y destruyen un cáncer. La inmunoterapia adoptiva (inyección de células anticancerígenas generadas a partir de células del sistema inmune del paciente) basada en los LIT ayudan a reducir o eliminar un cáncer avanzado en algunos pacientes con melanomas.

citos) y monocinas (producto de monocitos y macrófagos), difieren de las clásicas hormonas, así la insulina, en que suelen actuar localmente y no circulan por la sangre.

Partiendo de una mejor comprensión del sistema inmune, mi grupo siguió varias líneas de investigación relacionadas con la inmunoterapia. Uno de los retos que nos planteamos fue desarrollar una inmunoterapia adoptiva basada en los linfocitos, con la esperanza de sacar provecho de la especificidad de dichas células. Estamos estudiando también los efectos que se producen en los pacientes cuando, para estimular la actividad anticancerígena de los linfocitos circulantes, se les administra una o más citocinas.

El principal obstáculo con el que tropezamos a la hora de poner a punto la técnica de transferencia celular para el tratamiento de cánceres humanos fue nuestra incapacidad para aislar, a partir de los cánceres de los pacientes, linfocitos con actividad anticancerígena y poder multiplicarlos en cultivo. Los estudios realizados con animales, sin embargo, permitían abrigar esperanzas sobre las posibilidades de este tipo de terapia.

En animales, se pueden conseguir células del sistema inmune con actividad antitumoral tras varias inmunizaciones con células tumorales. De hecho, a finales de los años sesenta, Peter Alexander, del londinense Instituto de Investigaciones Chester Beatty, y Alexander Fefer, de la Universidad de Washington, demostraron que la aplicación intravenosa de linfocitos procedentes de ratones inmunizados en ratones de la misma es-



2. LAS CELULAS LAK (células asesinas activadas por linfocinas), descritas en 1980, constituyen otra arma experimental anticancerígena. En los estudios con ratones (*izquierda*) la producción comienza con la extirpación del bazo de animales sanos (*a*). Se aíslan los linfocitos del bazo (*b*) y se cultivan durante tres días con interleucina-2 (IL-2) (*c*), un producto de características parecidas a las hormonas, producida por las células *T*. Durante este tiempo, la interleucina-2 hace que ciertos linfocitos, conocidos por células nulas, se conviertan en células LAK (*d*), capaces de reconocer y atacar varias formas de cáncer. En estos estudios (*e*), las células LAK y la interleucina-2 se inyectan conjuntamente en ratones portadores de tumores. En los estudios con humanos (*derecha*), se aíslan linfocitos del torrente sanguíneo (*a*) y se cultivan con interleucina-2 (*b*), para que generen células LAK (*c*). Para el tratamiento de los pacientes (*d*) se inyectan, vía intravenosa, unos 50.000 millones de células LAK, con interleucina-2.

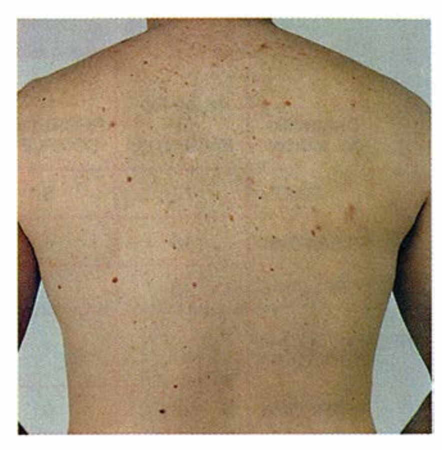
tirpe consanguínea portadores de tumores podía provocar la regresión del tumor. (Como los animales consanguíneos son genética e inmunológicamente idénticos, el sistema inmune del receptor no detecta que los linfocitos procedan de otro animal, y no los destruye.) Sin embargo, no había manera de obtener linfocitos para su aplicación en humanos.

Mis primeros escarceos con la terapia de la transferencia celular en humanos fueron fruto de la desesperación. En 1968, poco después de tropezarme con el paciente cuyo cáncer de estómago había desaparecido espontáneamente, conseguí un poco de su sangre, con la que realicé una transfusión en otro hombre que también tenía cáncer de estómago, y que estaba a punto de morir. La transfusión no ejerció ningún efecto en la enfermedad del segundo paciente. Intentos similares realizados por otros médicos también fracasaron.

Poco después traté a una serie de pacientes afectados de cáncer, inyectándoles linfocitos procedentes de cerdos previamente inmunizados contra los cánceres de dichos pacientes. La inyección de grandes cantidades de linfocitos de cerdo no acarreó ningún efecto perjudicial, pero tampoco contribuyó a mejorar el estado de los pacientes. Por tanto, aunque el tratamiento del cáncer basado en la transferencia de linfocitos seguía pareciéndonos atractivo, la imposibilidad de aislar y cultivar la gran cantidad de células que se necesitaban para que el tratamiento tuviese éxito, paralizó el progreso.

Un descubrimiento realizado en 1976 nos espoleó. Robert C. Gallo y sus colegas, del Instituto Nacional del Cáncer, describieron una molécula, que originalmente se denominó factor de crecimiento de las células *T*, y que ahora se la conoce por interleucina-2 (IL-2). Esta citocina es producida por las células *T* coadyuvantes y promueve la replicación de estas mismas células y de las células *T* citotóxicas estimuladas por antígenos [véase “Interleucina-2”, por Kendall A. Smith; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1990].

El descubrimiento de la interleucina-2, y el posterior desarrollo de métodos para cultivar grandes cantidades de clones de células *T* gracias a la citocina, dieron pie a una nueva opción. Pensé que, si lográbamos aislar de un paciente aunque sólo fuese una pequeña cantidad de células *T* reactivas frente al tumor del propio individuo, nos sería dado poder multiplicar esos linfocitos en el laboratorio y

3. MELANOMAS que se han propagado por toda la espalda (*izquierda*); desaparecen tras la infusión de células LAK e IL-2 (*derecha*). Con este tratamiento se consigue la regresión del cáncer en el 10 por ciento de los pacientes con melanomas o cáncer de riñón en fase avanzada. (Fotografía de S. A. Rosenberg.)

producir las grandes cantidades que se requerían en la terapia de transferencia celular.

Antes de ensayar en un paciente la capacidad anticancerígena de esas células cultivadas, tendríamos que demostrar primero que las células inyectadas conservaban sus propiedades originales y que, en animales, eran capaces de provocar una fuerte respuesta anticancerígena. Por tanto, mientras pensábamos de qué forma íbamos a identificar a las células *T* sensibles a los tumores en humanos, realizamos simultáneamente en animales diversos estudios con linfocitos cultivados.

En 1981, Maury Rosenstein, un becario postdoctoral de mi laboratorio, demostró que las células *T* cultivadas inyectadas en ratones mantenían la capacidad de reconocer al antígeno: aceleraban el rechazo específico de injertos de piel. Al cabo de un año, Timothy J. Eberlein, médico residente, y yo demostrábamos que las células cultivadas podían inducir en ratones la regresión de cánceres con una metástasis generalizada.

En este trabajo ampliamos una estrategia que Fefer y sus colaboradores habían utilizado con éxito. El grupo de Fefer había inducido la formación de un linfoma en la cavidad abdominal de un ratón. Consiguieron, a continuación, la regresión del tumor inoculando células *T* cultivadas de ratón inmunizado en la misma cavidad. Eberlein inyectó células derivadas del mismo linfoma en la planta del pie de ratones, esperó el desarrollo de la metástasis e inyectó, entonces, en una vena células *T* cultivadas de ratón inmunizado.

Descubrimos que el tratamiento podía causar la completa regresión, no sólo del tumor que se desarrollaba en la planta del pie, sino también del cáncer que se había propagado a la sangre y a los nódulos linfáticos. Este resultado era muy importante, pues significaba que las células *T* cultivadas no tenían por qué ser inoculadas directamente en el cáncer; una vez en el torrente sanguíneo, ellas mismas podían encontrar a las células cancerosas.

Estudios posteriores, realizados por John H. Donohue, otro médico residente de mi laboratorio, demostraron que la administración simultánea de interleucina-2 con células *T* cultivadas intensificaba los efectos antitumorales de la terapia de la transferencia celular, induciendo la regresión del cáncer con menor número de células *T*. Probablemente, la citocina coadyuvaba haciendo que las células transferidas se multiplicasen en el cuerpo.

Aunque estos resultados fueron alentadores, continuábamos bloqueados por el problema del aislamiento de células *T* con actividad antitumoral de los pacientes. Hasta que un descubrimiento inesperado, realizado durante ese tiempo, nos llevó a la primera inmunoterapia adoptiva del cáncer humano.

La nueva estrategia surgió del descubrimiento en 1980 de que la interleucina-2 tenía una actividad insólita. Iliana Yron, una becaria postdoctoral, y yo supusimos que, si el cuerpo era capaz de desarrollar una respuesta inmunológica contra el cáncer, el propio tumor tendría probablemente la mayor concentración de linfocitos específicos del tumor. En colaboración con Paul J. Spiess, biólogo de mi laboratorio, Yron cultivó células tumorales con interleucina-2, con el propósito de multiplicar y aislar la po-

Diagnosis del cáncer	TRATAMIENTO CON CELULAS LAK E IL-2: NUMERO DE PACIENTES	REGRESION COMPLETA	REGRES. PARC. (50% O MAS DE LA MASA TUMORAL	REGRESION COMPLETA O PARCIAL	TRATAMIENTO CON IL-2 SOLA: NUMERO DE PACIENTES	REGRESION COMPLETA	REGRES. PARC. (50% O MAS DE LA MASA TUMORAL	REGRESION COMPLETA O PARCIAL
RIÑON	72	8	17	25 (35%)	54	4	8	12 (22%)
MELANOMA	48	4	6	10 (21%)	42	0	10	10 (24%)
COLORRECTAL	30	1	4	5 (17%)	12	0	0	0
LINFOMAS (SALVO DE HODGKIN)	7	1	3	4 (57%)	11	0	0	0
SARCOMA	6	0	0	0	—	—	—	—
PULMON	5	0	0	0	—	—	—	—
PECHO	—	—	—	—	3	0	0	0
OTROS	9	0	0	0	8	0	0	0
TOTAL	177	14	30	44 (25%)	130	4	18	22 (17%)

4. MAS DE 300 PACIENTES con cánceres avanzados han sido tratados con células LAK e interleucina-2, o con interleucina-2, que por sí sola puede causar cierta regresión del cáncer tanto en ratones como en humanos. En ratones, la terapia combinada es más eficaz que la interleucina-2 sola.

blación de linfocitos específicos de ese particular tumor. Para sorpresa de ellos, se hallaron con que, en tres o cuatro días, antes incluso de que los linfocitos se multiplicasen, las células cancerosas próximas a los leucocitos del cultivo se morían. Daba la impresión de que la interleucina-2 tenía una actividad desconocida hasta ese momento: estimulaba determinados linfocitos de forma que reconociesen y matasen las células cancerosas.

El descubrimiento de mis colegas planteaba la posibilidad excitante de que no necesitásemos identificar a los linfocitos que se activaban frente al cáncer de un paciente; quizá podríamos inducir sin más la actividad antitumoral de células latentes. Los estudios que siguieron a este descubrimiento así lo confirmaron. Cuando Yron y Spiess expusieron linfocitos procedentes del bazo de ratones sanos a la acción de la interleucina-2, los linfocitos tratados mataban células tumorales. A continuación, Michael T. Lotze, cirujano residente, y yo aplicamos el mismo tipo de experimento en humanos. Demostramos que, si tratábamos con interleucina-2 linfocitos procedentes de sangre de personas sanas, esos linfocitos mataban *in vitro* una amplia gama de células cancerosas humanas, como las procedentes de melanomas (cáncer de piel), cánceres de colon y sarcomas (cáncer de tejido conectivo). Las células activadas, que luego llamaríamos células asesinas activadas por linfocinas (LAK, de "Lymphokine-Activated Killer"), no dañan las células normales.

La genealogía de las células constituyó otra fuente de sorpresa. Cuando Elizabeth A. Grimm, becaria postdoctoral que se incorporó entonces a mi laboratorio, examinó con detalle las células LAK, observó que no eran células *T* citotóxicas, ni ningún tipo de célula *T*. Tampoco se trataba de células *B*. Procedían de la población "nula" que constituye aproximadamente el 5 por ciento del total de linfocitos circulantes. Estas células, comunes en los mamíferos, parecen ser parte de un primitivo mecanismo de inmunovigilancia, capaz de eliminar inespecíficamente células cancerosas o con algún tipo de alteración, sin tener que reconocer de antemano ningún antígeno. El hecho de que las células LAK matasen *in vitro* células procedentes de diferentes tipos de tumores sugería que la inyección en pacientes con cáncer podría ser beneficiosa.

La idea debía someterse a ensayo en animales antes de su aplicación humana. En 1984, en el primer experimento de inmunoterapia con células LAK llevado a cabo con éxito en mi laboratorio, Amitabha Mazumder, becario que trabajaba en oncología pediátrica, inyectó las células por vía intravenosa en ratones cuyos melanomas habían originado metástasis en el pulmón. Al cabo de dos semanas encontramos que el tumor de los pulmones de los ratones tratados era menor que en los del grupo control, sin tratamiento. Poco después, demostraba yo con James J. Mulé, becario postdoctoral, que la administración de interleucina-2 junto con células LAK robustecía la actividad antitumoral de las células, igual que ocurriera antes cuando se introducía la citocina con células *T* procedentes de animales inmunizados.

Otras investigaciones revelaron que la interleucina-2 mejoraba la eficacia terapéutica del tratamiento con células LAK porque estimulaba su multiplicación en el cuerpo. Stephen E. Ettinghausen, cirujano residente, me ayudó a descubrir que las células LAK se dividían en los órganos de los ratones, cuando inyectábamos simultáneamente interleucina-2, pero no cuando se administraban solas. Los estudios sugerían que, en animales, las células LAK podían viajar a través del cuerpo, hasta llegar al cáncer. Activadas por la interleucina-2, las células proliferan también en las masas tumorales y destruyen las células cancerosas.

Dado que la interleucina-2 mejoraba los efectos del tratamiento con células LAK, nos preguntamos naturalmente si la simple inyección de citocina en ratón podría activar las propiedades anticancerosas de los linfocitos del organismo. Si así fuese, probablemente se necesitarían grandes cantidades, ya que los riñones no tardan en destruir la interleucina-2 circulante. Cuando se clonó el gen de la interleucina-2 y se pudo disponer de

grandes cantidades del producto, realizamos el experimento. En efecto, dosis muy altas del producto tenían, por sí solas, efectos antitumorales en ratones, aunque los resultados no alcanzaban la espectacularidad de la administración añadida de células LAK.

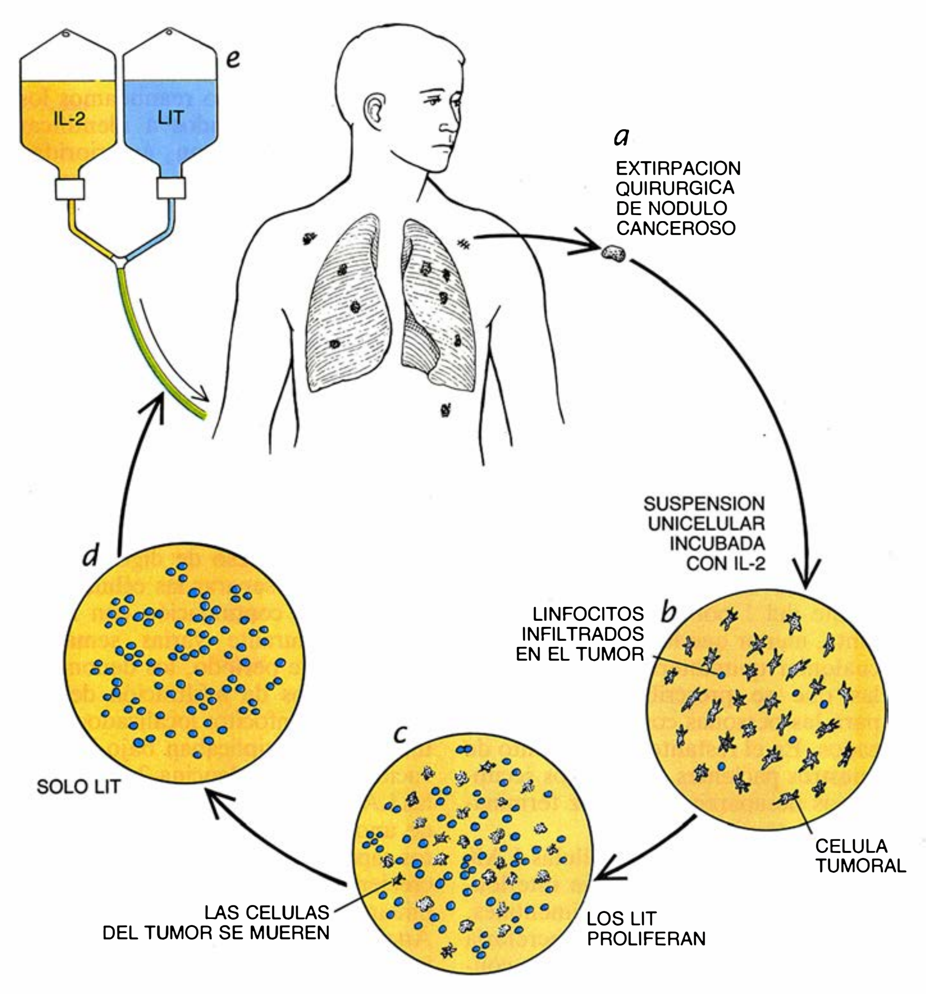
A principios de 1984, tras llevar a cabo ensayos clínicos preliminares con linfocitos asesinos, activados con estimulantes inmunológicos no citocínicos, estábamos ya preparados para emprender la primera fase de ensayos que nos permitiera establecer en humanos las dosis máximas toleradas de células LAK e interleucina-2. Ninguno de estos dos elementos se habían administrado antes por separado; no podíamos, pues, comenzar sin más con la terapia combinada. Había que ensayar cada sustancia independientemente. Todos los pacientes, de estas y posteriores pruebas, tenían un cáncer avanzado, que no había respondido a ninguna de las terapias convencionales. La esperanza de vida en todos los casos no superaba escasos meses.

Tratamos a seis pacientes con células LAK activadas, obtenidas tras aislar linfocitos del propio paciente e incubarlos con interleucina-2. Normalmente aislábamos los linfocitos a partir de sangre del sistema circulatorio [*véase la figura 2*]. Otros 39 pacientes fueron tratados sólo con diversas dosis de interleucina-2. Ningún paciente desarrolló una respuesta antitumoral detectable. A finales de 1984, la Secretaría de Alimentación y Farmacia nos concedió permiso para ensayar la combinación de células LAK e interleucina-2 en el tratamiento de pacientes con cáncer avanzado.

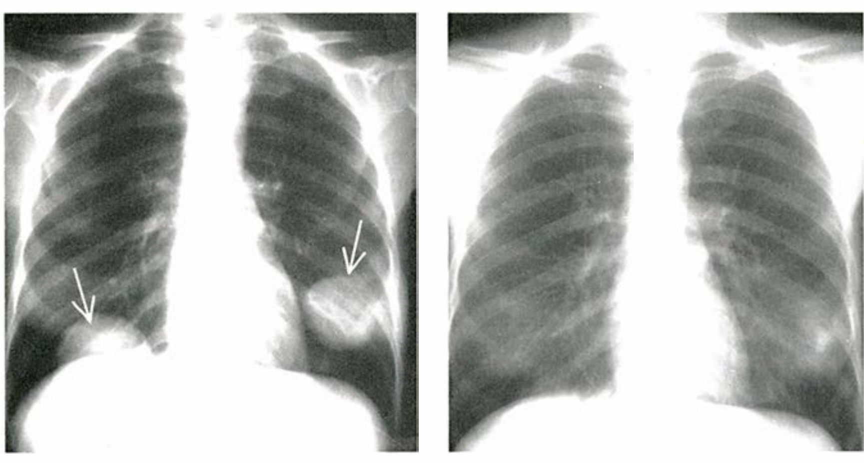
Uno de los primeros pacientes de la nueva serie de ensayos fue una enfermera de 29 años de Florida; tenía un melanoma extendido por todo el cuerpo, que le interesaba también brazos, muslos, espalda y nalgas. Algunos de los tumores habían sido extirpados quirúrgicamente, pero habían aparecido otros que no respondían al tratamiento con interferón. Empezamos la terapia combinada con células LAK e interleucina-2 en noviembre de 1984. A los tres meses, todos sus tumores habían desaparecido. Hoy, cinco años después, sigue libre de la enfermedad.

Su caso, que apareció publicado en 1985, junto con otros 24, en el *New England Journal of Medicine*, fue la primera demostración de que una terapia basada en el reforzamiento de la actividad de los propios linfocitos de un paciente podía inducir la regresión de un cáncer. Hasta la fecha, hemos estudiado más de 150 pacientes con cáncer avanzado, la mayoría de los cuales presentaban melanomas o cáncer de riñón. (En la mayoría de los pacientes, el tumor o tumores originales habían sido extirpados, y en todos los casos el cáncer se había propagado.) Hemos conseguido una regresión completa del tumor en el 10 por ciento, aproximadamente, de los pacientes con melanoma, y en la misma proporción de los casos de pacientes con cáncer de riñón. La masa tumoral disminuyó al menos un 50 por ciento en otro 10 por ciento de los pacientes con melanomas y en un 25 por ciento de los que padecían cáncer de riñón. Se ha conseguido una regresión parcial o total de cánceres avanzados en pacientes con linfomas (excluido el tipo Hodgkin) y cánceres de colon. En cuanto a tejidos específicos, se han eliminado o reducido metástasis del pulmón, hígado, hueso, piel y tejido subcutáneo.

La terapia funciona, tal parece, en los humanos lo mismo que en los ratones. Cuando extirpamos nódulos cancerosos de los pacientes que habían recibido la inmunoterapia, encontramos una acusada infiltración de linfocitos, así como muchas células tumorales muertas. Parecía como si las células LAK y otros linfocitos se abriesen camino hasta el tumor y allí, bajo la influencia de la administración continua de interleucina-2, se dividiesen, provocando la regresión del cáncer. Otros estudios han demostrado después que dosis altas de interleucina-2, por sí solas, pueden también inducir la regresión del cáncer en algunos pacientes. Queda por determinar, no obstante, si este tratamien-



5. LOS LIT, que parecen más eficaces que las células LAK, tardan un mes o más en generarse para su administración a los pacientes. Tras extraer un nódulo del tejido canceroso de un paciente (*a*), se separan sus células con tratamientos enzimáticos; a continuación, se cultivan con interleucina-2 (*b*). Bajo la influencia de la interleucina-2, los linfocitos dispersos por el tumor –los LIT (*azul*)– comienzan a proliferar rápidamente y atacar las células cancerosas (*c*). Al cabo de 30 a 45 días, los linfocitos del cultivo han remplazado completamente a las células del tumor (*d*). Se inyectan en el paciente unos 200.000 millones de linfocitos de infiltración del tumor, junto con interleucina-2 (*e*).



6. IMAGEN DE RAYOS-X tomada en octubre de 1987 (*izquierda*), que muestra la metástasis de un melanoma hasta los pulmones de un paciente (*flechas*). En diciembre, después de someter al paciente a un tratamiento con LIT e interleucina-2, la mayor parte del cáncer ha desaparecido (*derecha*). De veinte pacientes con melanomas avanzados sujetos a la misma terapia, once presentaron una regresión de su masa tumoral de al menos el cincuenta por ciento. (Radiografía del autor.)

to es tan eficaz como la terapia combinada.

La inmunoterapia basada en la administración de células LAK más interleucina-2, o en algunos casos de interleucina-2 sola, es, por tanto, un tratamiento que puede ayudar al 20 por ciento de los pacientes con ciertos cánceres avanzados. Pero el éxito tiene su precio: pueden aparecer efectos secundarios. La proliferación de linfocitos en los tejidos puede entorpecer la función de órganos vitales. La administración de altas dosis de interleucina-2 provoca la filtración de fluidos desde la sangre hacia los tejidos, siendo común la ganancia de peso. Más raramente, la acumulación de fluidos se interfiere en la función de los pulmones y dificulta el envío de oxígeno a los tejidos. Muy de vez en cuando, los pacientes mueren por los efectos de la interleucina-2. Dicha mortalidad –aproximadamente del 1 por ciento– es, no obstante, menor que la asociada con casi cualquier quimioterapia sistémica de las que se prescriben actualmente para las personas con cánceres avanzados. En el restante 99 por ciento de nuestros pacientes, los efectos secundarios desaparecen una vez terminado el tratamiento.

Los tratamientos con células LAK e interleucina-2, o sólo con interleucina-2, son todavía experimentales. En 1987, sin embargo, la Secretaría para la Alimentación y Farmacia concedió el preceptivo permiso para que los centros federales implicados en la investigación y tratamiento del cáncer administrasen dichas terapias a pacientes con melanomas o cánceres de riñón avanzados.

Los buenos resultados obtenidos con las células LAK nos alentaron a proseguir y buscar células dotadas de mayor poder anticancerígeno. Recientemente hemos encontrado tales células. Las descubrimos hace unos cuatro años, cuando reanudamos los esfuerzos encaminados a identificar células activadas con anterioridad para reaccionar contra el cáncer específico de un paciente. Partimos de la hipótesis conocida ya: si el sistema inmune se había puesto en marcha para reaccionar contra un cáncer, el centro tumoral tendría la concentración más alta de linfocitos sensibles al cáncer. Y nos pusimos a crear nuevas técnicas para aislar linfocitos a partir de tumores.

En uno de los métodos, se extirpaba por vía quirúrgica un pequeño tumor de un animal, se le sometía a un proceso de digestión enzimática para separar las células y se cultivaban a continuación con interleucina-2 durante varias semanas. Durante este período, los denominados linfocitos de infiltración del tumor (LIT), linfocitos localizados en el tumor, se multiplicaban bajo la activación de la interleucina-2. Las células LAK dejaban de proliferar al cabo de unos diez días, pero otros linfocitos capaces de matar el tumor seguían creciendo vigorosamente hasta terminar por remplazar al propio tumor. Analizamos estos LIT que proliferaban y estudiamos sus efectos en animales.

Los LIT que invadían el cultivo resultaron ser las clásicas células *T* citotóxicas. A diferencia de las células LAK, éstas sí presentaban la especificidad que inicialmente buscábamos. Cuando se incuban con las células tumorales *in vitro*, los LIT suelen matar sólo las células de los tumores de donde proceden, pero no a otras. De hecho, representan la mejor prueba de que al menos algunos enfermos de cáncer son capaces de poner en marcha una reacción inmunológica específica contra su tumor.

Cuando inyectamos en ratones LIT citotóxicos, recién aislados, encontramos que eran, en relación al número de células, unas 50 a 100 veces más eficaces que las células LAK a la hora de provocar la regresión del tumor, descubrimiento que publicamos en 1986. Eso significaba que, si se requerían 100 millones de células LAK para producir una regresión del 50 por ciento en el cáncer de un animal, bastarían sólo de uno a dos millones de LIT para conseguir los mismos resultados. Encontramos también que los LIT eliminaban mejor que las LAK los cánceres en ratones con tumores muy extendidos.

Ocurría todo ello no mucho antes de que abordáramos el estudio, en humanos, de la eficacia de esta terapia basada en los LIT. Para obtenerlos, extirpábamos al paciente, quirúrgicamente, un nódulo tumoral del tamaño de una pequeña ciruela, bajo anestesia local. Los nódulos nos proporcionaban unos 50 millones de células tumorales, que cultivábamos con interleucina-2, hasta que todas murieran y fueran remplazadas por una activa población de LIT en proceso de multiplicación. Finalmente inyectábamos, por vía intravenosa, unos 200.000 millones de esas células, más interleucina-2.

Los datos relativos a los primeros 20 pacientes tratados con esa estrategia aparecieron en el *New England Journal*, en diciembre de 1988, tres años después de la publicación del éxito de las primeras pruebas con células LAK en humanos. Todos los pacientes tenían melanomas. Quince no se habían sometido a ningún tratamiento anterior con interleucina-2; en nueve de ellos, el melanoma sufrió una regresión de al menos el 50 por ciento. El mismo grado de reducción del tumor se observó en dos de los cinco pacientes que ya habían recibido sin ningún éxito altas dosis de interleucina-2. Por tanto, el 55 por ciento de nuestro grupo respondió bien a la terapia. La verdad es que la razón de respuesta dobló de lejos la observada cuando administramos células LAK e interleucina a pacientes con melanoma. No sabemos hasta cuándo persistirán, por término medio, estas regresiones del tumor; de momento, los cánceres permanecen en completa

o parcial remisión por un período que oscila entre varios meses y más de un año.

¿Cómo operan los LIT? Estudios realizados con células marcadas radiactivamente han demostrado que una fracción de esos linfocitos se desplazan hasta el tumor y se acumulan allí en los días que siguen a la inyección de los LIT. Análisis de ARN mensajeros, los moldes para la síntesis celular de proteínas, sugieren que los LIT destruyen las células tumorales, no sólo por contacto directo, sino también a través de la producción de citocinas capaces de mediar en la destrucción de las células del tumor.

La terapia basada en los LIT, al incluir la administración de interleucina-2, provoca efectos secundarios muy similares a los de la terapia con células LAK. No obstante, aquellos linfocitos requieren menos interleucina-2 para mantenerse vivos y activos en el cuerpo que éstas y, por tanto, en el futuro, podríamos administrar menos interleucina-2 y conjurar la aparición de efectos secundarios.

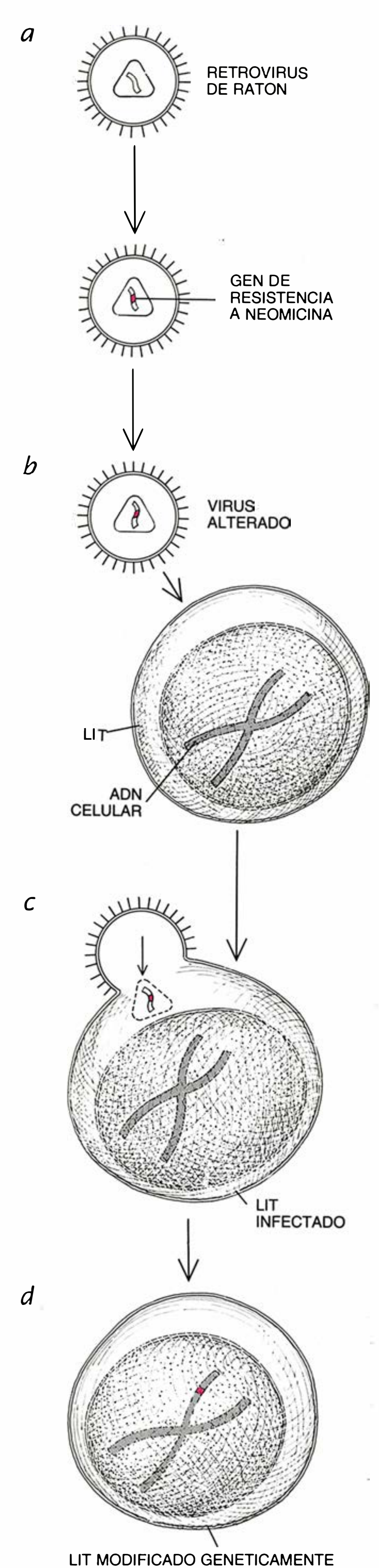
Ambas terapias, la de las células LAK y los LIT, se aprovechan de la presencia de células que la naturaleza ha suministrado a los pacientes, y son útiles para algunas personas con ciertos tipos de cáncer. ¿Pueden mejorarse las propiedades terapéuticas innatas de esas células realizando en sus genes ligeros cambios, cuidadosamente ideados? Mi laboratorio está colaborando con otros dos para obtener y ensayar este tipo de linfocitos. Los jefes de esos laboratorios, R. Michael Blaese, del Instituto Nacional del Cáncer, y W. French Anderson, del Instituto Nacional del Corazón, Sangre y Pulmón, ambos de EE.UU., han puesto a punto técnicas de transferencia génica cuyo objetivo a largo plazo era corregir defectos congénitos en humanos.

En 1988, Blaese, Anderson y yo proyectamos una estrategia para realizar, en dos fases, ensayos con linfocitos, manipulados por ingeniería genética, en pacientes con cáncer. Comenzaríamos por introducir un gen foráneo que determinara la síntesis de una proteína; serviría ésta de mero marcador y nos ayudaría a establecer el destino de los LIT en los pacientes, así como a recobrar las células para posteriores análisis. Decidimos utilizar un gen que porta información para una proteína que dota de resistencia, a las bacterias, ante una forma del antibiótico neomicina. Como los LIT serán las únicas células del cuerpo que van a producir dicha proteína, la sustancia nos proporcionará una forma fácil de identificar a los linfocitos transferidos. En esta fase, ahora en marcha, hemos conseguido la primera introducción con éxito de genes foráneos en seres humanos.

En la segunda fase, aún por comenzar, insertaremos en los LIT un gen que podría intensificar su potencial terapéutico. Entre los candidatos que estamos considerando citaremos los genes correspondientes al factor de la necrosis tumoral de citocinas y el del interferón alfa (ambos con propiedades antitumorales) o quizás el propio gen de la interleucina-2.

Nuestra propuesta para completar la primera fase era sencilla. Extirparíamos un fragmento del tumor de un paciente con melanoma avanzado, y cultivaríamos los LIT, como se indicó anteriormente. Al cabo de unas dos semanas, cuando todas las células del cáncer hubiesen muerto, tomaríamos una pequeña muestra de los LIT e introduciríamos el gen de resistencia ante la neomicina. Aunque abundan las técnicas que permiten introducir genes en células de mamíferos, sólo una, basada en la actividad de los retrovirus (virus de ARN), es lo suficientemente eficaz para nuestros propósitos. Elegimos un retrovirus de ratón, que manipulamos de forma que pudiese introducir el gen que nos interesaba en los LIT, sin que se reprodujese. Para ello, se eliminaron todas las secuencias génicas necesarias en la replicación del virus; y se las sustituyó por el gen de resistencia a la neomicina [*véase la figura 7*].

Una vez el retrovirus hubiera modificado los LIT, las células humanas modificadas se multiplicarían en paralelo con los LIT originales. Tras comprobar que el nuevo gen se inser-



7. INSERCION de un gen foráneo en los LIT, con la mediación de un retrovirus de ratón, el cual puede integrar sus propios genes en el material genético de una célula humana. Para obtener los únicos LIT genéticamente modificados que han sido administrados a pacientes por ahora, los investigadores sustituyen genes retrovíricos esenciales para la replicación del virus por un gen que determina una proteína que confiere a las células resistencia ante los efectos letales del antibiótico neomicina (*a*). A continuación, el virus modificado se cultiva con los LIT (*b*), de forma que el virus pueda infectarlos (*c*) e inserte su material genético en el ADN celular (*d*). Una vez allí, el gen foráneo se replica cada vez que lo haga el LIT infectado. Como los LIT modificados expresan el gen foráneo, son las únicas células resistentes a la neomicina; se distinguen fácilmente del resto de las células del cuerpo. Sirven, pues, de marcadores para revelar el destino de los LIT dentro del organismo de los pacientes.

tara y expresase, determinando la síntesis de proteína correspondiente en los LIT, inyectaríamos en los pacientes las células modificadas junto con las no tratadas. (Las células no tratadas se incluyen para suministrar la dosis terapéutica de LIT deseada.) También se administraría interleucina-2.

Debido a lo novedoso de la tecnología de transferencia génica, y al hecho de que nunca se había autorizado ningún estudio de transferencia génica en seres humanos, el gobierno evaluó con mucha atención las cuestiones prácticas y éticas planteadas por los ensayos que proponíamos. Iniciamos todo el proceso burocrático el 20 de junio de 1988, enviando nuestro protocolo a la Comisión de Evaluación del Instituto Nacional de la Salud. Recibimos el visto bueno de James Wyngaarden, a la sazón director del Instituto, el 19 de enero de 1989. El despacho nos permitía iniciar un ensayo clínico con 10 pacientes que presentaran melanomas avanzados, todos ellos con una esperanza de vida de 90 días, o menos.

Durante los meses que mediaron, el Comité de Bioseguridad y el Comité Consultivo sobre ADN recombinante del Instituto, así como la Secretaría para la Alimentación y Farmacia, realizaron también sus propias evaluaciones del proyecto. Estos grupos insistieron en que demostrásemos que podíamos insertar el gen marcador en los LIT humanos e inducir, en las células, la síntesis de la proteína correspondiente. Nos pidieron también que demostrásemos que los LIT no sufrían una alteración significativa tras la inserción del gen, que podíamos detectar las células marcadas en animales de laboratorio y que el riesgo para los pacientes era bajo, y nulo para el público en general. Dimos cumplidas satisfacciones a todos estos requerimientos. Entonces, el día en que Wyngaarden comunicó su aprobación de los ensayos, un activista antibiotecnólogo interpuso un pleito para impedir nuestras investigaciones, aduciendo que el estudio no se había evaluado suficientemente. Sufrimos otro retraso, aunque, por suerte, el pleito se resolvió en seguida.

El 22 de mayo de 1989 se llevó a cabo el primer tratamiento de una persona con células modificadas genéticamente. Esperamos publicar muy pronto los resultados obtenidos con los primeros cinco pacientes que reciben estas células. En un año esperamos comenzar los estudios de los LIT genéticamente modificados para incrementar la eficacia terapéutica. Las posibilidades de explotación de esos linfocitos genéticamente modificados para la terapia del cáncer tardarán probablemente varios años en determinarse.

El potencial terapéutico de los linfocitos genéticamente modificados trasciende el tratamiento del cáncer. Las células podrían ser los vehículos idóneos para introducir genes que pueden tratar diversos tipos de enfermedades, además del cáncer. Por ejemplo, se podrán introducir en el cuerpo, para el tratamiento de la hemofilia, genes que dirigen la producción de los factores de coagulación. Los genes que determinan la enzima desaminasa de la adenosina podrían emplearse en enfermedades graves de inmunodeficiencia combinada, que causan en los niños una anormal propensión a infecciones que amenazan su vida.

Lo que una vez fue intuición se está convirtiendo en realidad. La inmunoterapia del cáncer puede ser efectiva. Los tratamientos desarrollados hasta ahora pueden ayudar sólo a un número limitado de pacientes, tienen efectos secundarios tóxicos y son complejos y engorrosos de realizar. Pero quizás esto sea sólo el principio. Se realizan gigantescos esfuerzos en laboratorios de todo el mundo para lograr que la inmunoterapia constituya una vía práctica y efectiva de tratar el cáncer humano.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

IMPORTANT ADVANCES IN ONCOLOGY, 1986. Dirigido por Vincent T. DeVita, Jr., Samuel Hellman y Steven A. Rosenberg. J. B. Lippincott Co., 1986.

THE DEVELOPMENT OF NEW IMMUNOTHERAPIES FOR THE TREATMENT OF CANCER USING INTERLEUKIN-2. Steven A. Rosenberg en *Annals of Surgery*, vol. 208, n.º 2, págs. 121-135; agosto de 1988.

USE OF TUMOR-INFILTRATING LYMPHOCYTES AND INTERLEUKIN-2 IN THE IMMUNOTHERAPY OF PATIENTS WITH METASTATIC MELANOMA: A PRELIMINARY REPORT. S. A. Rosenberg, B. S. Packard, P. M. Aebersold, D. Solomon, S. L. Topalian, S. T. Toy, P. Simon, M. T. Lotze, J. C. Y. C. A. Seipp, C. Simpson, C. Carter, S. Bock, D. Schwartzentruber, J. P. Wei y D. E. White en *New England Journal of Medicine*, vol. 319, n.º 25, págs. 1676-1680; 22 de diciembre de 1988.

EXPERIENCE WITH THE USE OF HIGH-DOSE INTERLEUKIN-2 IN THE TREATMENT OF 652 CANCER PATIENTS. S. A. Rosenberg, M. T. Lotze, J. C. Yang, P. M. Aebersold, W. M. Linehan, C. A. Seipp y D. E. White en *Annals of Surgery*, vol. 210, n.º 4, págs. 474-485; octubre de 1989.

Ciencia y sociedad

¿Es la gran explosión una predicción inevitable de la relatividad general?

La relatividad general, concebida y desarrollada por Albert Einstein al principio del segundo decenio de este siglo y formulada de forma precisa finalmente por él mismo en 1915, ha sido desde entonces y hasta hoy día comúnmente aceptada por la comunidad científica como la teoría más adecuada para la decripción clásica de la interacción gravitatoria e, incluso, nos atreveríamos a asegurar, lo será en un futuro a medio plazo. Dejando a un lado el hecho de ser una de las más "bellas y gratificantes" teorías (racionalmente hablando), sus indudables avances, tanto en la explicación de fenómenos previamente conocidos pero no explicados, como en la predicción de fenómenos físicos nuevos, le han deparado un enorme éxito y un auge universal. Añadiendo a lo anterior la dificultad de encontrar en nuestro entorno habitual situaciones experimentales nuevas con las que poder comprobar más extensamente su validez, llegamos a la conclusión de que la relatividad general, a pesar de su complejidad, es una teoría firmemente asentada.

Sin embargo, como cualquier otra teoría, la relatividad general no está exenta de cuestiones que levantan polémica entre los propios profesionales especialistas en el tema. La más controvertida de todas ellas es, a nuestro entender, la predicción de la aparición de lo que se ha dado en llamar *singularidades*.

¿Qué es una singularidad? Hablando de forma poco rigurosa, una singularidad es, a grandes rasgos, una "zona" donde el propio concepto de espacio-tiempo deja de tener significado claro, o alternativamente, allá donde las leyes de la física (y en particular de la relatividad general) dejan de tener validez. Ya la propia definición origina problemas que causan cierto malestar. ¿Cómo es posible que las leyes de la física, supuestas válidas de forma universal, predigan su propio fracaso? ¿Y por qué una teoría cuya base fundamental es el espacio-tiempo predice la falta de validez de dicho concepto bajo precisas circunstancias?

Se pueden distinguir tres situaciones físicas diferentes en las que aparecen singularidades del espacio-tiempo. La primera es la colisión de ondas gravitatorias. A nuestro juicio, ésta es la más problemática de todas y la que necesita de manera más urgente una solución o descripción clarificadora. La segunda es el colapso gravitatorio de estrellas dotadas de gran masa, que conduce a la aparición de horizontes que encierran la singularidad; o sea, a los agujeros negros. Esta singularidad es la menos preocupante de todas. Finalmente, se tiene la *gran explosión* ("big-bang"), que es una singularidad cosmológica interpretada a veces como el posible origen de nuestro universo. Pero, ¿por qué aparecen las singularidades? Simplificando, la razón fundamental es una concentración inmensamente grande de energía, lo cual produce una curvatura de tal magnitud en el espacio-tiempo que, en realidad, éste deja de tener sentido tal y como se le define habitualmente.

No vamos a interesarnos aquí por las dos primeras situaciones con singularidad citadas previamente, sino sólo por las singularidades del tipo de la gran explosión, para lo cual empezaremos por esbozar someramente la historia de los modelos cosmológicos relativistas. Los primeros en aparecer fueron el universo estático de Einstein y las soluciones de de Sitter. Ambos modelos necesitan la introducción artificial, en las ecuaciones, de la constante cosmológica; debido a ello, y a otras razones, el modelo de un universo estático y el modelo de de Sitter fueron rápidamente desechados. Entre esas otras razones tuvo mucho que ver el descubrimiento por Hubble de la expansión del universo observado. Este hallazgo dio el espaldarazo definitivo a los modelos de Friedman, Robertson y Walker (FRW). Modelos que son soluciones de las ecuaciones de Einstein con la importante propiedad de que el espacio es homogéneo (todos los puntos del espacio son equivalentes) e isótropo (todas las direcciones espaciales son equivalentes).

Los modelos FRW son el soporte esencial de los modelos cosmológicos "estándar" en boga actualmente, y fueron los primeros en presentar una singularidad del tipo de la gran explosión. Por aquellos tiempos, no se concedió mucha importancia a dicha singularidad y se atribuyó su aparición a la excesiva simetría que poseen las soluciones FRW. Bastante después, en los años sesenta, se construyeron los modelos de Bianchi, en los que se elimina la isotropía pero se mantiene la homogeneidad espacial. Por último, hasta recientemente no se pudieron estudiar modelos inhomogéneos, y, a pesar de todo, sólo se ha hecho con modelos muy sencillos debido a la gran complejidad matemática que encierran las ecuaciones de Einstein. En cualquier caso, pronto se verificó que la inmensa mayoría de todos estos modelos presentaban de una u otra forma una singularidad del tipo de la gran explosión: la idea de que las singularidades eran inevitables comenzó a tomar cuerpo.

Pero antes de mencionar los resultados fundamentales obtenidos sobre la inevitabilidad de las singularidades, comentemos, por completitud, otro descubrimiento esencial en toda esta historia: la radiación de fondo de microondas, detectada de forma casual por Penzias y Wilson. Este hecho y las observaciones actuales que determinan el altísimo grado de isotropía que presenta dicha radiación a nuestro alrededor, junto con un principio elemental antiantropocéntrico de tipo copernicano (nuestra galaxia no ocupa ningún lugar privilegiado en el universo), dan el apoyo definitivo a los modelos FRW para la descripción del universo. Estos modelos han tenido muchos otros éxitos; en particular, explican correctamente la abundancia de helio observada que otros modelos no pueden justificar.

Pero retomemos el hilo donde lo habíamos dejado. El hecho de que la inmensa mayoría de los modelos cosmológicos presentaran una singularidad del tipo de la gran explosión impulsó, entre otros motivos, a Roger Penrose y Stephen Hawking a plantearse la posibilidad de probar, de manera general y sin usar modelos concretos, la inevitabilidad de las singularidades. Fue así como ambos científicos británicos, de forma independiente, establecieron los llamados *teoremas de singularidades*, que prueban de forma rigurosa la existencia de singularidades bajo hipótesis bastante razonables. Una hipótesis común a todos estos teoremas es la llamada *condición de energía* (la densidad de energía es positiva para todo observador), que tiene un soporte empírico evidente. Otra hipótesis bastante usada en los teoremas es la denominada *condición de causalidad* (ningún observador puede viajar en el tiempo a su propio pasado), que de nuevo tiene una base empírica nada desdeñable. Finalmente, se utilizan diversas hipótesis subsidiarias más o menos apropiadas según el caso a tratar.

La aparición de estos poderosos teoremas generales forzaron a la comunidad científica a tomarse en serio las singularidades y, en el caso particular de la gran explosión, habida cuenta de los fabulosos éxitos experimentales de los modelos FRW, se llegó a la casi definitiva aceptación de la necesidad de su existencia. Sólo quedaba esperar a la más que deseada teoría cuántica de la gravitación (a cuya formulación están dedicados actualmente muchísimos esfuerzos) para que pudiera dar una explicación quizás coherente y detallada de la explosión inicial.

Así las cosas, el único interés que restaba, aparte del teórico, para seguir estudiando modelos inhomogéneos y anisótropos era su posible aportación a la resolución de uno de los pocos problemas que los modelos estándar de FRW no explican: la formación de galaxias. Según todos los cálculos teóricos (incluyendo, tal parece, los basados en la inflación, es decir, una rapidísima expansión que podría haber sufrido el universo en sus albores), los modelos estándar no permiten una condensación suficientemente rápida de las posibles inhomogeneidades locales que tuviera el universo para que se formaran tantas galaxias tal y como hoy las conocemos. Por esta razón, algunos relativistas estábamos dedicando nuestro tiempo a la búsqueda de modelos inhomogéneos, que podrían servir para resolver ese problema, ya que una de las posibilidades era que el universo no hubiera sido homogéneo e isótropo en épocas primarias. En cualquier caso, nadie dudaba de que todos estos modelos posibles tendrían una singularidad inicial de tipo de la gran explosión, a tenor de lo indicado por los teoremas y la experiencia.

Pero, como muchas otras veces, la sorpresa surgió. En un reciente artículo publicado por el autor (*Physical Review Letters*, 64, 2219 [1990]) se describe un modelo cosmológico que no presenta en absoluto una singularidad del tipo de la gran explosión, y que satisface los requerimientos físicos más importantes: las condiciones de energía y causalidad. Por lo demás, el modelo también satisface una ecuación de estado (relación entre la presión y la densidad de energía) realista para épocas en las que el universo haya estado dominado por la radiación. Por esta razón, el modelo no pretende y no puede describir el universo en su estado actual. Además, la mayoría de los datos observacionales no podrían explicarse con él, ya que la anisotropía que presenta es manifiesta. Pero esto no tiene excesiva importancia y el auténtico valor de esta nueva solución es que, al ser un contraejemplo evidente, prueba que los teoremas de singularidades no eliminan completamente la posibilidad de universos sin una singularidad inicial. Y, aún más importante, el mayor potencial de este nuevo resultado es que podría servir de revulsivo para que futuras investigaciones puedan construir modelos más completos y quizás ajustados a los resultados experimentales, pero que no surjan de una singularidad del tipo de la gran explosión. (*Investigación y Ciencia* publicará un artículo de Martín Senovilla en el que se expondrá el modelo cosmológico que se infiere de su innovación, un universo en el que se parte de un pasado temporal infinito y se prolonga hacia un futuro infinito. N. del E.)

Por lo tanto, la aparición de este resultado conduce a replantear y dejar abierta la cuestión que encabeza y da título a esta sucinta reseña, y estamos muy felices de haber contribuido modestamente a ello. (José M. Martín Senovilla.)

¿De quién es el conjunto atribuido a Mandelbrot?

¿Quién fue el descubridor del conjunto de Mandelbrot? La respuesta no es trivial. Calificado por esta misma revista "el objeto más complejo de la matemática", carece de una paternidad clara. La imagen generada mediante ordenador, infinitamente intrincada, sirve como representación de la teoría del caos y ha atraído el interés de un público muy dispar.

El conjunto está dedicado a Benoit B. Mandelbrot, matemático del Centro de Investigación Thomas J. Watson de IBM, acuñador del término fractal para describir la repetición de la morfología de un fenómeno (líneas de costa, copos de nieve, montañas, árboles, etcétera) a escalas cada vez menores. Mandelbrot pretende haber descubierto, él solo, el conjunto de su nombre, hace unos diez años. Dotado de propiedades fractales reclama su imagen y su "firma".

Otros tres matemáticos le disputan el honor. Dos de ellos mantienen haberlo descubierto y descrito sus propiedades, de forma independiente, por el tiempo en que lo hizo Mandelbrot. El tercero asegura que su trabajo sobre el conjunto en cuestión, no sólo precedió al de Mandelbrot, sino que le ayudó, además, en su empeño. La polémica, vieja en los círculos matemáticos, acaba de desatarse en la calle.

Los matemáticos rehúyen enzarzarse en público, pero Mandelbrot, que se considera a sí mismo una oveja negra, choca frecuentemente con sus colegas. "Si no fuera por su carácter", señala Robert L. Devaney, de la Universidad de Boston, admirador del trabajo de Mandelbrot, "no habría controversia".

Las espadas están en alto. Hasta los que desdeñan la popularidad del conjunto admiten su significación matemática. Dennis P. Sullivan, de la Universidad Municipal de Nueva York, lo considera el "crisol" donde probar ideas acerca del comportamiento de sistemas dinámicos (o no lineales, complejos y caóticos).

Parte del interés del conjunto radica en su formación a partir de una expresión sencilla : $z^2 + c$, donde z y c son números complejos, que consisten en un número imaginario (un múltiplo de la raíz cuadrada de 1) combinado con un número real. Se empieza asignando un valor fijo a c y fijando $z = 0$. A partir de aquí se calcula la ecuación. Nos dará un valor z_1, que, a su vez, se introducirá dentro de la ecuación para obtener un nuevo valor z_2, que, de nuevo, se introducirá en la ecuación para obtener un nuevo valor z_3, y así sucesivamente. Algunos valores de c determinan que, introducidos en una serie de iteraciones, se disparen los diferentes valores de z hacia el infinito; para otros valores de c, los valores de z se mueven, por contra, dentro de cierto entorno. Este último grupo de valores complejos de c constituye lo que se denomina conjunto de Mandelbrot.

Cuando se representan gráficamente en el plano complejo, los miembros del conjunto se agrupan en una forma característica que, de lejos, evoca la de un corazón tumoroso, una cucaracha, un pollo a la brasa y otras figuras.

Miradas de cerca, las fronteras del conjunto revelan que las líneas no están bien definidas, sino que se asemejan a la luz trémula de una llama. La sucesiva ampliación de los contornos sumerge al observador en una barroqueña, por fantástica, sucesión de imágenes. Algunas, así la forma de corazón, se mantienen, aunque siempre aparecen sutiles diferencias.

Cualquiera que disponga de un ordenador personal puede "descubrir" el conjunto de Mandelbrot [véase "Juegos de ordenador", INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1985]. Pero 11 años atrás, los ordenadores eran menos potentes y no abundaban los matemáticos dispuestos a asociar los computadores con la matemática seria.

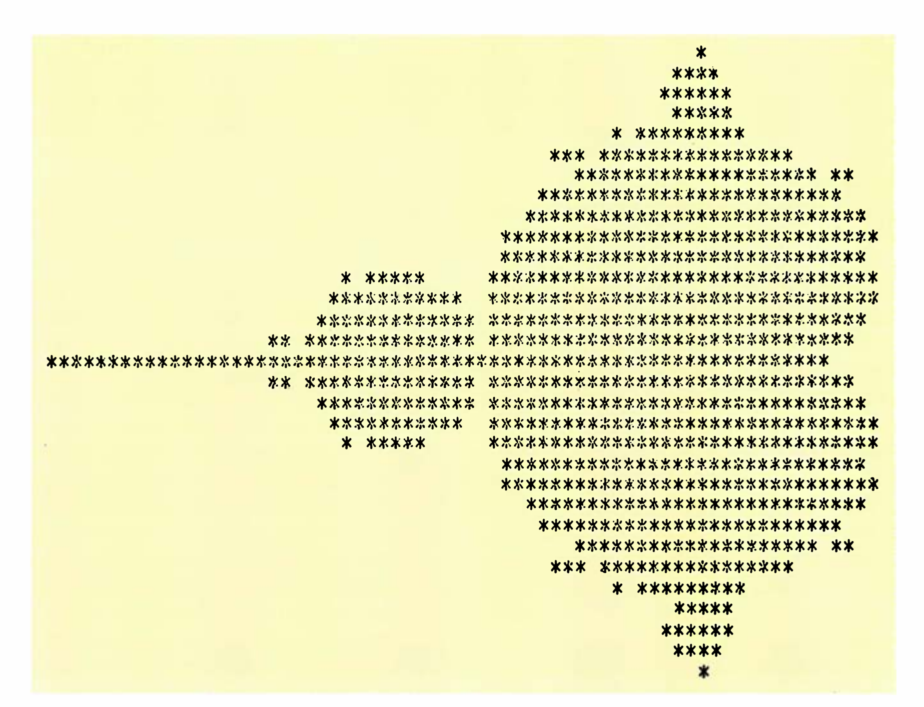
El propio Mandelbrot recordaba sus escarceos iniciales en el conjunto como "mera diversión". Recurrió al computador para representar los conjuntos de Julia, que se generan introduciendo números complejos en funciones iterativas. Las peculiares propiedades de estos conjuntos habían sido descritas ya en 1906 por el matemático francés Pierre Fatou. Deben su nombre a Gaston Julia, que una docena de años más tarde desarrolló con éxito el alcance de los mismos. Mandelbrot, que nació hace 65 años en Polonia, había leído el trabajo de ambos y había estudiado con Julia en la década de los cuarenta.

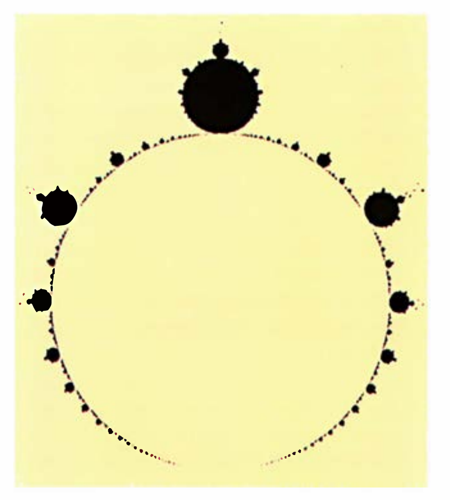
Las primeras imágenes de computador obtenidas por Mandelbrot sirvieron para confirmar que los conjuntos de Julia poseían propiedades fractales. Según afirma el propio Mandelbrot, a finales de 1979 empezó a producir imágenes reconocibles del conjunto de Mandelbrot, que viene a ser una generalización de los conjuntos de Julia. Más tarde consiguió imágenes del conjunto y explicó su significado en conferencias, artículos y libros. El descubrimiento y su trabajo sobre los fractales se convirtieron en objeto abordado por distintas publicaciones y utilizado a modo de reclamo publicitario.

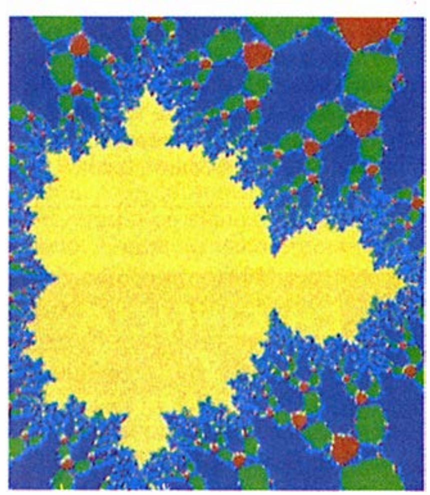
Nadie niega que las imágenes y descripciones de Mandelbrot despertaron la curiosidad de otros matemáticos. Entre ellos, John H. Hubbard, de la Universidad de Cornell, y Adrien Douady, de la Universidad de París. A comienzo de los ochenta, mientras se aprestaban a demostrar que las islitas que rodean el cuerpo principal del conjunto están unidas a él mediante filamentos infinitesimales, bautizaron ese ente matemático con el nombre de Mandelbrot. En 1986 escribía Douady: "Mandelbrot fue el primer creador de imágenes del conjunto, mediante un ordenador, y en dar su descripción".

Sin embargo, Douady afirma ahora que él y otros matemáticos empiezan a pensar que Mandelbrot se arroga sin rubor el trabajo realizado por otros sobre el conjunto y sobre temas relacionados con el caos. "Le gusta autocitarse", afirma Douady, "y es reacio a mencionar a otros que no estén muertos".

El pasado otoño, Steven G. Krantz, de la Universidad de Washington, aireó alguna de estas quejas en *Mathematical Intelligencer*, de periodicidad trimestral. A tenor de la tesis principal del artículo, los fractales, las imágenes generadas por ordenador y otros fenómenos matemáticos "populares" asociados con Mandelbrot







1. LA HISTORIA DEL CONJUNTO DE MANDELBROT puede ser como su imagen, más complicada de lo que parece. El conjunto de Mandelbrot puede generarse de múltiples maneras y adquirir formas diversas. La imagen publicada por Robert Brooks y J. Peter Matelski en 1981 (arriba) *se obtuvo a partir de la fórmula estándar* $z^2 + c$. *El artículo de Benoit B. Mandelbrot de 1980 muestra una imagen producida mediante una función ligeramente distinta* (abajo a la izquierda). *John H. Hubbard determinó, algunos años más tarde, que un proceso iterativo llamado método de Newton producía también una imagen distintiva del conjunto de Mandelbrot* (abajo, a la derecha).

no han contribuido al desarrollo de la matemática en la misma proporción que la publicidad de que han gozado.

Este punto de vista y el opuesto (los trabajos de Mandelbrot han constituido un estimulante impulso para la matemática) no son argumentos nuevos. Pero Krantz introduce una cuña en el debate, cuando afirma que el conjunto de Mandelbrot "no lo inventó Mandelbrot, ya que aparece en la bibliografía un par de años antes de que se estableciera la expresión *conjunto de Mandelbrot*". Cita un artículo de Robert Brooks y J. Peter Matelski publicado en las actas de una conferencia celebrada en Stony Brook, Nueva York, en el año 1978.

En el artículo de marras aparecen la fórmula $z^2 + c$ y la imagen inequívoca de impresión por ordenador del icono fundamental del conjunto. Brooks y Matelski matizan que no presentaron el artículo en la conferencia de 1978, aunque sí hicieron circular una primera versión a comienzos del 1979. Brooks, hoy en la Universidad de California en Los Ange-

les, presentó, durante la primavera de aquel año, el artículo en la de Harvard. (Mandelbrot, que por aquel entonces daba clases en Harvard, dice que no asistió a la exposición de Brooks y que el artículo lo vio años más tarde.) Ciertamente, el artículo no se publicó hasta comienzos de 1981.

Mandelbrot, en su refutación del artículo de Krantz, que tituló "Algunos 'hechos' que se evaporan con sólo examinarlos", escribió que él publicó una forma completa sobre el conjunto antes de que apareciera el artículo de Brooks y Matelski. (El artículo de Mandelbrot salió en *Annals of the New York Academy of Sciences* el 26 de diciembre de 1980, y comenta una función y una imagen que son variantes de lo que hoy se asocia con el conjunto de Mandelbrot, que éste no publicó hasta 1982.)

Mandelbrot también sugería que, aun cuando la publicación de Brooks y Matelski hubiera precedido a la suya, no se les puede considerar descubridores del conjunto, ya que no se dieron cuenta de su importancia. "Estaban cerca de algo que se demostraría especial, pero no pensaron en su alcance", escribió Mandelbrot.

En el siguiente número de *Intelligencer*, Brooks replicaba: "No sé cómo Mandelbrot puede estar tan seguro sobre lo que nosotros pensábamos o no". Brooks afirma que respeta los logros de Mandelbrot como divulgador y que no tiene nada que objetar a la denominación del conjunto, ya que "tiene más sentido que llamarlo gran cardioide", que era la manera en que él y Matelski lo habían bautizado. "Simplemente, me hubiera gustado que Mandelbrot hubiera sido más caballero."

Matelski, que trabaja en el Centro para Graduados de Hartford en Connecticut, apostilla que ni él ni Brooks pidieron a Krantz que les atribuyera el descubrimiento del conjunto de Mandelbrot. (Krantzl lo confirma, ya que fue otro matemático quien le habló del artículo.) Pero ahora que el asunto es de dominio público, Matelski confiesa que lo mismo a él que a Brooks les gustaría se los reconociera codescubridores junto con Mandelbrot.

El *Hartford Courant*, periódico que publicó la polémica, recoge las palabras de Matelski a ese respecto: "Para descubrir un continente no hace falta explotar todos sus recursos minerales. Basta con hincar la rodilla y besar la playa".

Hubbard, experto en el conjunto de Mandelbrot, ha presentado una sutil reivindicación sobre el tema. Según explica, en 1976 empezó a utilizar un computador para representar conjuntos de números complejos generados mediante un proceso iterativo conocido como método de Newton. Hubbard afirma que, aunque no cayó entonces en la cuenta, había encontrado una forma diferente de generar el conjunto de Mandelbrot.

A finales de 1978, Frederick Kochman, alumno de Hubbard, se acercó a Mandelbrot en cierto congreso y le mostró las imágenes de Hubbard. "Mandelbrot, recuerda Kochman, no pareció mostrar mayor interés." Sin embargo, al poco tiempo Mandelbrot escribió una carta a Hubbard invitándole a la sede de IBM para discutir sobre su trabajo. En la carta, que Hubbard conserva, Mandelbrot decía: "Al muestrear los trabajos de Fatou y Julia, había pensado en hacer estas cosas yo mismo, pero no tuve el coraje para acometerlas. Sin embargo, puedo decir que he estado esperando sus imágenes durante largo tiempo".

Hubbard explica que acudió a IBM a comienzos de 1979. Allí le explicó a Mandelbrot cómo programar un ordenador para dibujar la salida de las funciones iterativas. Hubbard acepta que entonces no llegó a apreciar todo el significado de sus propias imágenes; pero en ellas se veían partes del conjunto de Mandelbrot. También admite que Mandelbrot desarrolló un método superior para generar imágenes. Sin embargo, Hubbard mantiene que fue, y continúa siendo, "ultrajado" por el hecho de que Mandelbrot en el artículo de 1980 y en posteriores publicaciones lo haya ignorado. "Se trata de un quebranto de la ética matemática", afirma.

Mandelbrot reconoce haber visto "un primer dibujo del conjunto de Julia" realizado por Hubbard; niega, sin embargo, que la visión de este dibujo contribuyera a su propio descubrimiento. Responde a las críticas de Hubbard y Douady, acerca de su mezquindad a la hora de reconocer el mérito de otros, señalando que también se le ha acusado de aportar un exceso de citas. Añade que su omisión de los primeros resultados de Brooks y Matelski les evitó, quizás, el "escarnio" de su "fracaso en obtener algo con ellos".

¿Qué decir de la sugerencia de Hubbard, Matelski y Brooks según la cual el verdadero descubridor del conjunto de Mandelbrot es Fatou, el primero en definir el conjunto y en especular acerca de sus propiedades? Brooks aventura incluso que, "si Fatou hubiera tenido acceso a los modernos ordenadores, podría haber obtenido las elegantes figuras cosechadas por Matelski, Mandelbrot y yo mismo". Mandelbrot considera irrelevante esta afirmación e insiste en que la definición de Fatou del conjunto de Mandelbrot no supone el descubrimiento del mismo. "La definición no sirve de nada", señala, "hay que indicar también dónde reside su interés".

Otros matemáticos familiarizados con el tema no salen de su asombro ante el rumbo de los acontecimientos. A John Milnor, de la Universidad de Princeton, le "parece muy extraño e innecesario todo este alboroto". Afirma, a su vez, que ni Matelski, ni Brooks ni Mandelbrot han hecho nada importante dentro de las matemáticas. "Hubbard y Douady son los primeros en obtener algunos resultados interesantes que nos han permitido aprender algo sobre el conjunto."

¿Quién descubrió el conjunto de Mandelbrot? Para Sullivan, la respuesta carece de interés. Quizá. Sheldon Axler, editor de *Intelligencer*, piensa publicar una breve comunicación del matemático húngaro F. Riesz, en la que informa de su trabajo relacionado con el conjunto en el año 1952. La historia parece celar, todavía, muy sutiles detalles.

Ciencia y empresa

Mareos de altura

Los zarandeos y las pérdidas de la estabilidad son el pan de cada día para los pilotos, navegantes, astronautas y otros tripulantes. No se trata de ningún problema menor. Ni es barato el tiempo que pasan mareados, amén de molesto.

Hasta hace muy poco, apenas si se había investigado en la fisiología del mareo causado por movimiento, por más que los síntomas de náusea, sudor, somnolencia y vértigo resulten familiares para la mayoría de los viajeros. Nadie había acometido el estudio de las ondas cerebrales de baja frecuencia durante la evolución del mareo por movimiento.

Las configuraciones de las ondas cerebrales durante el mareo causado por movimiento guardan un notable parecido con las que se producen en ciertas convulsiones epilépticas. William E. Chelen, del Servicio Médico de las Fuerzas Aéreas estadounidense, mientras abordaba la forma insólita de las ondas, pensó en la posibilidad de tratar esa clase de mareo con un compuesto de fenitoína, el anticonvulsivo dilantín. "Está dando resultado", afirma. "No solamente los pacientes no devuelven, sino que se encuentran bien." Eficacia del fármaco que le induce a sospechar que el mareo provocado por movimiento podría deberse a un ataque parcial del cerebro o del pedúnculo cerebral, como pasa con las convulsiones de la epilepsia.

Los pilotos tienen prohibida la ingestión de medicamentos. No así los astronautas, que procuran evitar el mareo mediante comprimidos o llevando parches que dejan escapar escopolamina a través de la piel. Evitan así el vómito y la náusea, pero toman también dexedrina, una anfetamina, para contrarrestar los efectos sedantes secundarios. La combinación no da buen resultado, señala Chelen. "El setenta por cien de las personas que lo han tomado en el espacio cuentan que, a pesar de todo, siguen mareándose. No los incapacita del todo, pero les complica las cosas."

La decisión de medir las ondas cerebrales de baja frecuencia de una persona que sudaba y giraba sobre sí misma fue bastante sencilla, dice el investigador. Pero realizarlo fue complicado, recuerda Matthew Kabrisky, otro partícipe de la investigación. "El proceso de rutina no exige nada especial: pulso, movimiento de los ojos, ritmo respiratorio, número de volt que salen de sus intestinos revueltos." Pero el equipo usual de electroencefalografía (EEG) tiene aproximadamente el tamaño de un lavaplatos y pesa más de cien kilogramos. No está pensado para situarlo junto a una persona sentada en una silla giratoria.

Chelen puso en juego su versatilidad de ingeniero eléctrico, médico y radioaficionado para construir un EEG en miniatura, alimentado por baterías y sólo de unos centímetros cuadrados de tamaño. Se monta en la cabeza y mide las ondas cerebrales a frecuencias de la décima parte de las que se registran en clínica hospitalaria. La máquina detecta señales cerebrales del orden de 10 a 50 millonésimas de volt. Chelen aplica microagujas hipodérmicas de platino y electrodos de superficie, proclives al deslizamiento y al error en la recogida de datos por culpa del sudor.

Aunque el dilantín frena los síntomas del mareo provocado por movimiento, los investigadores confiesan que carecen de datos suficientes para determinar los efectos del fármaco sobre las ondas cerebrales aberrantes que acompañan al vértigo. No importa. Si bien fueron esas ondas peculiares las que encarrilaron el estudio de Chelen, reconoce que "se pueden sufrir ataques sin cambios EEG y registrarse cambios en las ondas cerebrales sin mostrar convulsiones clínicas". Al objeto de descubrir la existencia o no de correlación, el grupo de Chelen se apresta a cartografiar el cerebro y averiguar dónde se originan los cambios del EEG durante el mareo y cómo se extienden al resto del cerebro.

El paso siguiente consistirá en someter a ensayo otros fármacos anticonvulsivos –tales como la carbamazepina– que no tienen relación estructural con la fenitoína. Se espera con ello determinar hasta qué punto el mareo provocado por el movimiento constituye un trastorno real del tipo de ataque parcial o si el dilantín da buenos resultados por alguna otra razón. "En último término, estamos interesados en algo compatible con el vuelo. Quizá no encontremos un remedio para los pilotos, pero podríamos hallar algo bueno para los pasajeros", dice Chelen.

De momento, el público deberá de-



1. MAREO PROVOCADO POR MOVIMIENTO, objeto de investigación para la estabilidad de pilotos y astronautas.

jar en tierra sus esperanzas de fármacos eficaces. El fabricante del dilantín, Parke-Davis, ha demostrado su interés por los resultados de la investigación y podría emprender sus propios ensayos. Otras compañías farmacéuticas podrían sumarse, ya que las patentes del dilantín expiraron hace tiempo. Los laboratorios farmacéuticos prefieren ahora apostar por la modificación racional de las drogas, retorciendo compuestos conocidos para aplicarlos a otras necesidades.

Reventando el polvo

Son pegajosas como la goma. Es inútil tratar de lavarlas. O atacarlas con chorros de gas. Pero esas molestas motas, del tamaño de un virus, tienen que desaparecer. Cuando las líneas de los circuitos integrados se estrechan a menos de un micrometro, las partículas contaminantes provocan defectos y convierten los beneficios esperados en pérdidas seguras para los fabricantes.

Las fábricas de semiconductores brillan hoy como los chorros del oro. Sematech, consorcio manufacturero de circuitos integrados en la texana Austin, tiene una sala rutilante, donde la densidad de polvo es la de un guisante en cuatro kilómetros cúbicos de aire. Pero la limpieza, por sí sola, no resuelve el problema de los desperdicios generados en la impresión de circuitos en obleas de silicio. Los contaminantes que se originan en el proceso causan casi la mitad de los defectos de los microcircuitos.

¿Qué producto de limpieza poseerá potencia suficiente para eliminar las partículas sin estropear la oblea? Varios investigadores están explorando técnicas que usan haces de luz láser que borre el polvo de las obleas semiconductoras. "No hay procedimientos alternativos para librarse de las motas", dice Susan D. Allen, química de la Universidad de Iowa, que está patentando un método que se sirve del láser para la limpieza de los microcircuitos.

Hay otras técnicas que dan buen resultado, siempre y cuando el tamaño de las partículas a eliminar superen el medio micrometro. Pero los componentes del tamaño inferior al micrometro podrían verse afectados por granos que miden 0,1 micrometro o menos. Con tales proporciones, las fuerzas de van der Waals adhieren las partículas a las superficies de los circuitos con intensidad pareja a la de un enlace químico. Los chorros de gas, demasiado débiles, son incapaces de vencer esas fuerzas. Los chorros de gas reforzados con partículas de hielo logran desalojar algunas partículas, pero esos chorros son, a su vez, proclives a la contaminación.

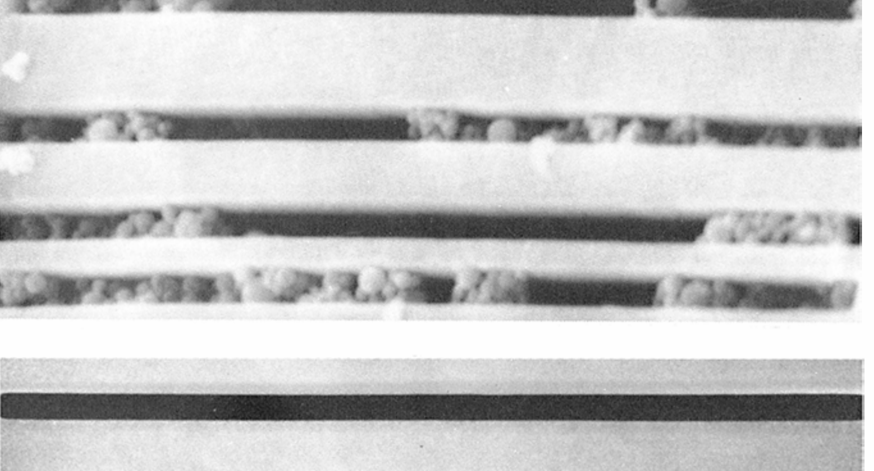
El lavado por líquidos agitados por ultrasonidos no puede filtrarse en escalas submicroscópicas; o lo que es lo mismo: añade tanta suciedad como quita. Los plasmas, o gases ionizados, eliminan las partículas al reaccionar químicamente con ellas, pero reaccionan también con los substratos. La atracción electrostática puede transferir la suciedad de un microcircuito a una lámina en contacto con él; mas, de nuevo, la lámina no se deja limpiar bien.

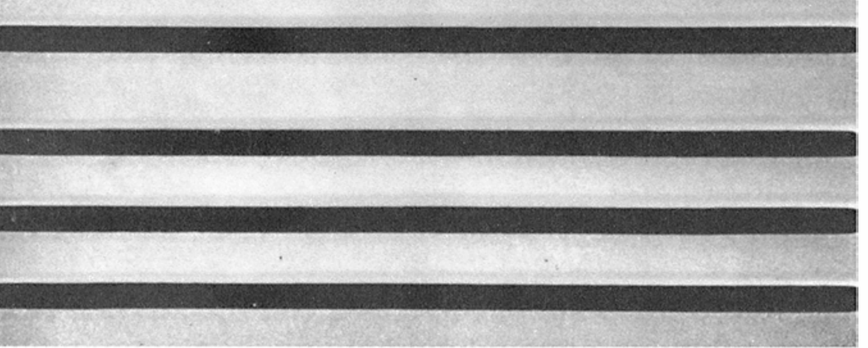
Los láseres presentan una doble ventaja: no rozan el microcircuito y emiten longitudes de onda que algunas substancias absorben mejor que otras. La técnica de Allen se funda en tal absorción diferencial. Somete las obleas de silicio a vapor de agua libre de polvo, que se acumula en las hendiduras que subyacen bajo las partículas. Ataca luego las obleas con láseres cuya emisión infrarroja coincide con las bandas de absorción del vapor de agua, pero no del silicio. El agua explota en forma de vapor, lanzando las partículas lejos de las obleas para que las arrastre la corriente de aire.

El nuevo método ha logrado así eliminar el polvo de superficies de silicio lisas, sin estropear el substrato. Texas Instruments está interesada en la técnica de Allen. Es lógico para ella y para todas las empresas de microcircuitos: la limpieza por láser podría ahorrar parte de los más de 300 millones de dólares que se invierten en limpieza en las instalaciones de fabricación de circuitos integrados. Hoy, los fabricantes occidentales de microelectrónica desechan un 40 por ciento de los centenares de microcircuitos producidos de cada oblea de silicio de 15 centímetros. Se sospecha que las empresas japonesas desperdician sólo el 10 por cien de sus microcircuitos.

Allen no limita su sistema al vapor de agua. "En principio, podríamos incluso usar argón", añade. Naturalmente, ello requeriría emplear un láser que emita una longitud de onda absorbible por el argón.

Por su parte, el grupo de Werner Zapka, del Centro Alemán de Tecnología de IBM en Sindelfingen, interviene directamente sobre la suciedad. Al dirigir un potente haz ultravioleta de un láser excímero sobre las partículas, las hace saltar de la oblea.





2. MOTAS SUBMICROSCOPICAS que tapan parcialmente las falsillas empleadas para imprimir circuitos en obleas de silicio (arriba)*. IBM está desarrollando un sistema con un láser excímero que las elimina* (abajo)*.*

Andrew C. Tam, del Centro de Investigación Almadén de IBM en la ciudad californiana de San José, está ahondando en la técnica de Zapka; según sus palabras, el láser elimina las partículas incluso de substratos con puntos de fusión similares.

Esto es importante, continúa Tam, porque la carencia de daños al substrato indica que el láser no puede estar vaporizando las partículas. Cree que el calor, por sí solo, provoca que las partículas salten, como al tostar maíz. Robert J. Baseman y Douglas W. Cooper, del Centro de Investigación Thomas J. Watson de IBM en Yorktown Heights, han visto bailar las partículas bajo el impulso de un láser excímero. "Mi impresión es que se podrían eliminar partículas del substrato sin dañarlo", asegura Baseman.

En cualquier caso, ningún sistema lasérico resuelve los problemas de limpieza que tiene planteados el Valle del Silicio. "Hay millones de partículas formadas por diferentes substancias," resume Tam. "Quién sabe cuál podrá eliminarse y cuál no." Pero se ha de encontrar alguna solución, o el microcircuito, cada vez más chico, se sofocará en su propio polvo.

La fuerza de la patente

Convertir el crudo de petróleo en alimento para el ganado con el concurso de una bacteria genéticamente manipulada pareció una idea razonable a Ananda M. Chakrabarty. Ocurría ello a finales de los sesenta. El petróleo era barato y la General Electric (GE) estaba dispuesta a financiar la investigación en su laboratorio neoyorquino de Schenectady. El proyecto se archivó cuando los precios del crudo subieron, pero no antes de que GE hubiera solicitado una patente, muy discutida, sobre una bacteria modificada para degradar el crudo con mayor eficacia que lo logran sus afines naturales.

La primera patente que comprometía a un organismo vivo se convirtió en piedra angular de la industria biotecnológica. Tras ocho años de negativas por parte de la Oficina de Patentes y Marcas Registradas de los Estados Unidos, protestas públicas y recursos legales, que llevaron el caso hasta el Tribunal Supremo, se concedió la patente. Hace 10 años, esa histórica decisión se aprobó por 5 votos contra 4, argumentándose que "podía concederse patente de cualquier cosa bajo el Sol que fuera realizada por el hombre".

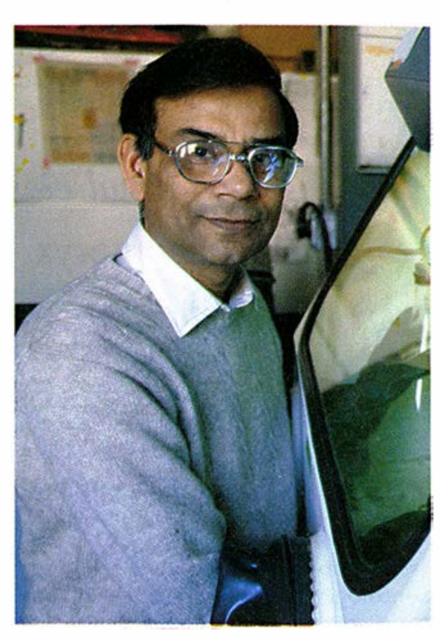
La patente concedió a la biotecnología en ciernes garantía de poder obtener beneficios de la investigación; pero negó a Chakrabarty el derecho a soltar su bacteria oleófaga. Chakrabarty confiaba en emplear el protozoo para limpiar derrames de petróleo. Aún sigue a la espera del permiso para dar rienda suelta a sus microorganismos alterados. No es asunto que le importe. Con suave acento de las Indias Orientales, dice: "No abrigo especial interés por ver a los bichos en acción. El convencer o no a la Oficina de Protección Ambiental (EPA) corresponde a los empresarios".

No le extraña demasido a la GE pugnar por convencer a la EPA. La empresa tenía otro frente abierto con la contaminación del Valle del Hudson por bifenilos policlorados. Coincidía, además, que los ecologistas pintaban un desastroso panorama ambiental si se dejaba libre la bacteria modificada. En las postrimerías de los setenta, la GE decidió suspender la investigación sobre los organismos. Chakrabarty abandonó la empresa privada y se refugió en su Universidad de Illinois. "Habíamos aprendido a cruzar la barrera de la evolución", musita, "pero la gente decía que era malo jugar con la vida".

Por fortuna para los pioneros de la biotecnología, menguados de recursos, la GE tenía el compromiso de patentar sus invenciones. Aunque la economía no justificaba ulteriores esfuerzos, el gigante industrial se consideró obligado a probar el carácter patentable de una nueva tecnología, dice Edward F. McKie, abogado que defendió el caso de GE ante el Tribunal Supremo. "Ya entonces estaba claro que, si no se podía proteger la manipulación genética, nadie se animaría a practicarla", recuerda.

De nuevo en su poyata del laboratorio, Chakrabarty trataba de hallar un camino que orillase el embrollo administrativo que aguardaba a sus microorganimos. Decidió aplicar el mismo enfoque que las compañías dedicadas a la producción biotecnológica de insulina y fármacos: emplearía las bacterias a modo de fábricas para generar substancias útiles. Petrogen, una compañía asentada en Arlington Heights, Illinois, se convirtió en un complacido socio. El pionero creía que podría vender un surfactante microbiano a las petroquímicas. Esta substancia no degrada el petróleo, sino que lo dispersa, como hace el detergente del lavaplatos con la grasa del tocino de una sartén.

Chakrabarty dio a Petrogen su primera entrega de surfactante en 1986. Una vez más, el momento era inoportuno: los precios del petróleo habían bajado. Las compañías petrolíferas habían perdido todo interés en los surfactantes para recuperar petróleo del sedimento que se forma en los tanques de almacenamiento. Resultaba más barato tirar el residuo. Petrogen trató también de inyectar surfactante en pozos de petróleo a punto de agotarse. No aumentó, sin embargo, la producción.



3. ANANDA M. CHAKRABARTY ganó la primera patente de un microorganismo sometido a manipulación genética en junio de 1980. Fotografía de Valentina von Schacht.

Chakrabarty sigue sin perder la compostura, aun cuando admite que las bacterias oleófagas quizá no vean nunca la luz del día. La vida fuera de un tubo de ensayo es muy dura para los organismos alterados. Pero hasta la naturaleza hostil palidece ante la oposición del ambiente político. "Es un rompecabezas. Demasiadas variables a tener en cuenta", explica Edward L. Korwek, abogado y científico, miembro de varios comités gubernamentales sobre medidas de seguridad ante los organismos sometidos a manipulación genética.

Empleando un proceso de "evolución dirigida", Chakrabarty está lentamente apartando a los microorganismos de su alimento habitual para ir acostumbrándolos a productos químicos. Chakrabarty espera que esta tecnología acierte con el lugar y el momento. Con el deshielo de las relaciones internacionales, los gobiernos pueden ver que "no necesitamos misiles. Sólo preocuparnos de nuestra salud y del medio ambiente".

Archaeopteryx

Antaño mal clasificado e, incluso, considerado un fraude, Archaeopteryx *sigue constituyendo una rica fuente de información sobre la evolución del vuelo en las aves*

Peter Wellnhofer

Con el cuerpo y la cola propios de un reptil y las plumas y alas de innegable aspecto aviar, *Archaeopteryx* proporciona a los paleontólogos la prueba más concluyente de que las aves evolucionaron a partir de los reptiles. De este animal prehistórico, del tamaño de una paloma, sólo se conocen seis esqueletos fósiles y la impresión de una pluma suelta; a pesar de su escasez, los paleontólogos han podido extraer de estos ejemplares una gran riqueza de información. Desde su descubrimiento, hace ya más de un siglo, *Archaeopteryx* ha sido objeto de acaloradas discusiones entre partidarios y críticos de la teoría de la evolución darwinista. Sin embargo, *Archaeopteryx* ha defendido tanto su propia reputación como la teoría de la evolución, frente a todos los desafíos, incluso contra las recientes acusaciones de fraude.

En 1985 el astrónomo británico Fred Hoyle declaró que el ejemplar de *Archaeopteryx* que existe en el Museo Británico de Historia Natural era una falsificación. Afirmaba que alguien había creado el espécimen aplicando, sobre un esqueleto fosilizado de *Compsognathus* —pequeño dinosaurio del grupo de los terópodos—, una capa fina formada por una mezcla de material de revestimiento y roca pulverizada; posteriormente, habría realizado sobre esta capa impresiones con plumas. Hoyle y sus colegas sugirieron también que los demás fósiles de *Archaeopteryx* o eran falsificaciones o, en realidad, no mostraban impresiones de plumas. *Archaeopteryx* no tardó en convertirse, para los ingleses, en "el pollo de Piltdown".

Ante la publicidad que rodeó el suceso, el Museo Británico decidió organizar en 1987 una exposición especial, simultánea a una revisión científica del fósil. Varias pruebas demostraron que la roca en la que se habían encontrado las impresiones no difería ni en estructura ni en composición del material circundante. A pesar del aspecto moderno de las plumas de *Archaeopteryx*, nada apuntaba a un fraude. Más aún, los fragmentos de roca que engloban el esqueleto se ajustan perfectamente, lo que habría resultado imposible en el caso de que el fósil hubiese sido falsificado por medio de la adición de una capa de cemento.

Por ironía de las cosas, los rasgos que Hoyle vio como prueba de la falta de autenticidad del fósil —una mezcla de plumas actuales y de restos esqueléticos pertenecientes a *Compsognathus*— constituyen una de las claves más importantes de que los paleontólogos disponen para entender la evolución seguida por las aves y el vuelo de éstas. La combinación de características anatómicas propias de dos tipos distintos de animales hacen, de *Archaeopteryx*, el ave más antigua que se conoce, un genuino ejemplo de libro acerca de lo que es una forma de transición entre los reptiles y las aves modernas.

El descubrimiento original de *Archaeopteryx* vino como pedido de encargo por los darwinistas. En 1861, sólo dos años después de que se publicase la obra de Darwin *El origen de las especies, por medio de la selección natural*, se halló un esqueleto fosilizado con impresiones de plumas en la cantera de calizas de Solnhofen, en Baviera. El ejemplar pasó a manos de Carl Häberlein, de Pappenheim, quien más tarde lo vendió al Museo Británico.

Este fósil, conocido habitualmente por el ejemplar de Londres, no constituía la primera prueba de que las aves ya existían hace 150 millones de años, en el Jurásico Superior. Un año antes del descubrimiento del esqueleto de Londres, un trabajador de la cantera de Solnhofen había hallado la impresión de una pluma. Hasta ese momento los fósiles de aves más antiguos conocidos pertenecían al Terciario, es decir, a una época casi 100 millones de años posterior a la de formación de las calizas de Solnhofen.

En 1861, Hermann von Meyer, paleontólogo del Instituto de Investigación y Museo Senckenberg de Historia Natural, de Frankfurt, escribía que la impresión de la pluma "constituye un verdadero fósil que reproduce a la perfección la pluma de un ave". En el mismo informe mencionaba también el ejemplar de Londres: "Un esqueleto casi completo de un animal cubierto con plumas ha sido hallado en las pizarras litográficas. Se dice que muestra muchas desviaciones con respecto a las aves modernas. Por mi parte publicaré la pluma que he investigado, junto con una exacta ilustración de la misma. Considero que *Archaeopteryx lithographica* es un nombre adecuado para este animal".

El ave de Solnhofen se bautizaba así con el nombre científico de *Archaeopteryx lithographica. Archaeopteryx* significa "ala antigua" y *lithographica* alude al hecho de que, durante el siglo XIX, la caliza de Solnhofen se usaba habitualmente como pizarra litográfica. Sólo las rocas extraídas de la cantera de Solnhofen poseían la dureza, compactación y finura de grano requeridas en los procesos de impresión de litografías. Y estas mismas cualidades permitieron la conservación de los huesos y las impresiones de plumas de *Archaeop-*

PETER WELLNHOFER es subdirector y conservador en jefe de la Colección de Paleontología y Geología Histórica del estado de Baviera en Munich. Se ha especializado en el estudio de aves fósiles y reptiles voladores. En 1964 se doctoró en paleontología por la Universidad Ludwig Maximilians de Munich. Es autor de numerosos artículos sobre *Archaeopteryx* y director de la *Encyclopedia of Paleoherpetology*.



1. ***ARCHAEOPTERYX***, **un ave prehistórica que vivió en el Jurásico, hace 150 millones de años, representa un ejemplo perfecto de una forma de transición en la evolución desde los reptiles hasta las aves modernas. El ejemplar de la Universidad Humboldt de Berlín muestra de modo claro un plumaje típicamente aviar en las alas y la cola. El cráneo y el esqueleto casi reptiliano del fósil también están excepcionalmente bien conservados.**

teryx con nitidez y perfección increíbles.

Las condiciones geológicas que condujeron a la formación de las calizas de Solnhofen explican la conservación excepcional de los fósiles de *Archaeopteryx*. Durante la última parte del período Jurásico, el área que comprendía la actual parte meridional de la Selva de Franconia era un lagoon tropical dividido en varias cuencas por complejos arrecifales submarinos. Al norte del lagoon se encontraba la masa continental de lo que constituye hoy la parte central de Alemania; al sur se hallaba el Mar de Tethys.

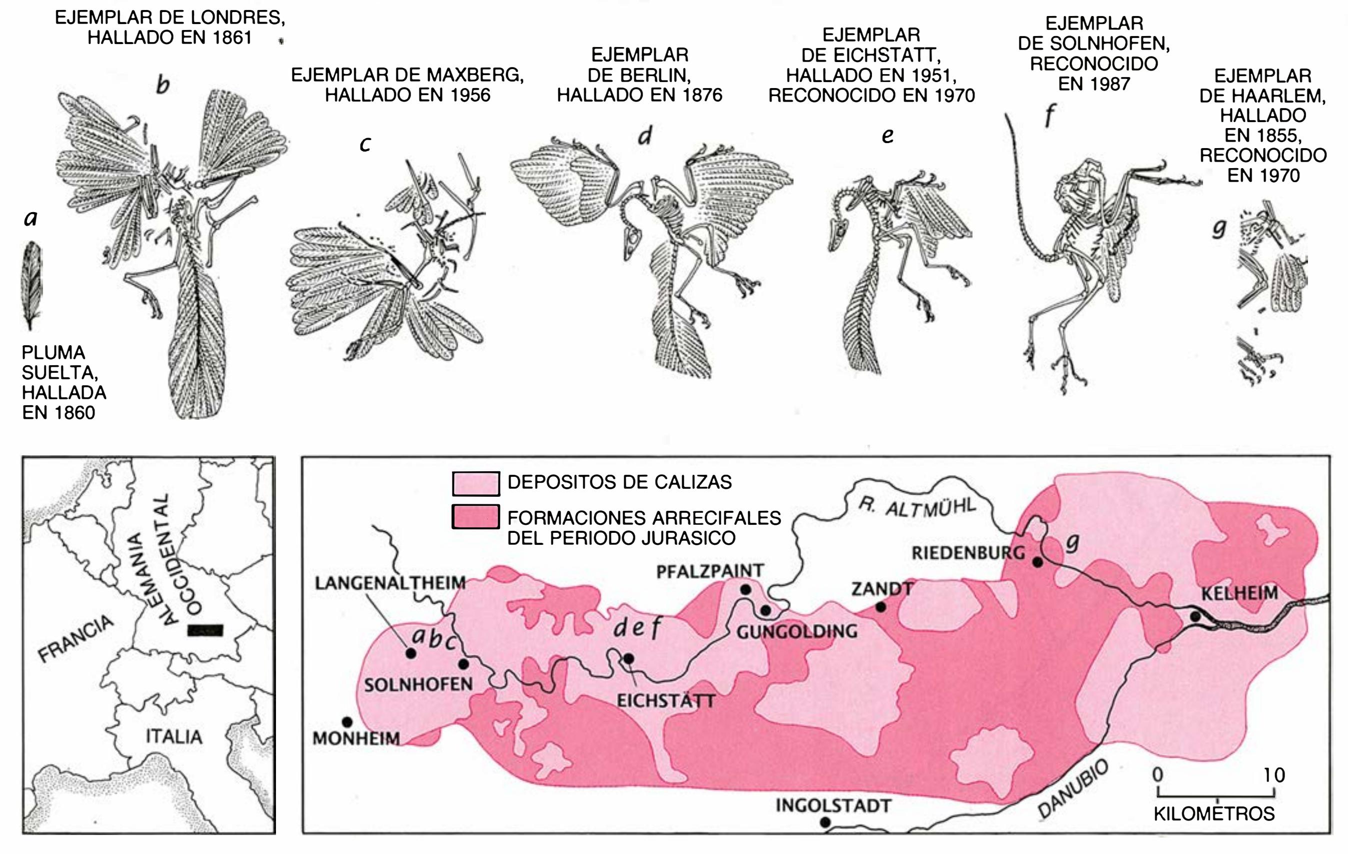
Esta región no era lo que se dice un paraíso de los Mares del Sur: el agua del lagoon, demasiado salina, apenas contenía oxígeno. Por tanto, se trataba de un mundo inhóspito para la mayoría de las formas de vida. Esporádicamente algunas tormentas provocaban inundaciones que rebasaban las barreras arrecifales del sur, transportando multitud de plantas y animales marinos hasta las cuencas interiores. En las aguas del lagoon estos organismos morían pronto, hundiéndose hasta el fondo, sepultados por capas de barros y limos.

Las plantas y animales que vivían en las tierras continentales del norte y en las islas adyacentes también podían alcanzar el lagoon de Solnhofen. Estas tierras albergaban muchos tipos de vida: coníferas, cícadas, ginkgos, insectos, dinosaurios y *Archaeopteryx*. Las tormentas tropicales podían haber empujado algunas criaturas voladoras hacia el mar, arrastrándolas hasta el lagoon; asimismo, las plantas y caparazones de animales podrían haber sido transportados hasta allí por las corrientes. Debido a que en el ambiente salino del lagoon apenas existirían microorganismos o animales carroñeros, los restos de los organismos muertos sufrirían muy poca descomposición antes de quedar fosilizados en los sedimentos limosos.

Hasta ahora se han encontrado seis esqueletos de *Archaeopteryx*, todos ellos en las calizas de Solnhofen, pertenecientes al Jurásico Superior. Constituyen las aves fósiles más antiguas que se conocen. (Sankar Chatterjee, de la Universidad Técnica de Texas en Lubbock, ha identificado como pertenecientes a un ave ciertos restos esqueléticos fósiles hallados en Texas, en estratos del Triásico y, por tanto, mucho más antiguos. Lo ha denominado *Protoavis*; sin embargo, estos restos esqueléticos son muy fragmentarios y aún no se han presentado pruebas concluyentes de su naturaleza aviar.) Cada uno de estos especímenes contribuye a la comprensión actual del comportamiento y morfología de *Archaeopteryx* y del origen de las aves.

El ejemplar de Londres corresponde a un esqueleto casi entero de *Archaeopteryx*. El cráneo, sin embargo, aparece fragmentado y tan sólo se han conservado la estructura que aloja el cerebro y algunos trozos de huesos mandibulares provistos de dientes. Además de unas claras impresiones del plumaje sobre las alas y la cola, presenta otro rasgo típicamente aviar: la fúrcula, hueso formado de la fusión de los huesos de la clavícula. Hasta hace sólo unos años se creía que la fúrcula era exclusiva de las aves; sin embargo, se han encontrado fúrculas en algunos dinosaurios del Cretácico.

En el otoño de 1876, en una cantera situada cerca de Eichstätt, se descubrió un segundo espécimen, más tarde vendido a Ernst Häberlein —hijo del hombre que atrajo la aten-



2. SEIS ESQUELETOS y la impresión de una pluma aislada constituyen hasta la fecha los únicos fósiles conocidos de *Archaeopteryx*. Se desenterraron en una región de la Selva de Franconia, en Alemania Occidental (*izquierda*), que durante el Jurásico fue un lagoon subdividido por formaciones arrecifales. Las letras que aparecen en el mapa (*a-g*) señalan dónde se encontró cada fósil. Inicialmente, algunos de ellos fueron clasificados entre los pteranodontes o adscritos a otros dinosaurios y, hasta años después de su descubrimiento, no fueron identificados como *Archaeopteryx*.

ción de los paleontólogos sobre el primer ejemplar. Inicialmente, Häberlein clasificó el fósil entre los reptiles voladores. Sólo después de que Häberlein separase las capas de roca que cubrían parte del ejemplar, aparecieron a la luz unas impresiones bien conservadas de plumas, con lo que hubo que proceder a la reclasificación del fósil. Finalmente, en 1881, el Museo de Historia Natural de la Universidad Humboldt de Berlín adquirió este espécimen de *Archaeopteryx*.

Conocido por ejemplar de Berlín, está mejor conservado que el de Londres. El esqueleto articulado se encuentra en su posición original, lo que significa que, cuando el animal quedó enterrado en el fondo del lagoon de Solnhofen, todavía no había comenzado su descomposición. Las mandíbulas presentan dientes reptilianos. La extrema torsión del cuello hacia atrás, provocada por la contracción que experimentan los ligamentos después de que los músculos se relajan tras la muerte, es característica de las aves, pero se ha observado también en fósiles de reptiles voladores y en algunos pequeños dinosaurios de largo cuello (*Compsognathus*, por ejemplo).

Las alas del ejemplar de Berlín muestran impresiones, muy bien conservadas, de plumas. Los tres "dedos" del ala (o "mano", según la terminología habitual de los anatomistas) eran móviles y estaban equipados con uñas afiladas y fuertemente curvadas. Los dedos de las aves modernas son más cortos, están parcialmente soldados entre sí y carecen de uñas.

La larga cola del ejemplar de Berlín, cuyo aspecto recuerda la de los saurios, exhibe un plumaje biseriado; es decir, porta dos series de plumas que se disponen simétricamente según un plano horizontal a lo largo de la espina caudal. Las impresiones de las plumas, de sutiles detalles, ofrecen la estructura entera, incluidas las barbas trabadas.

Desde el descubrimiento del ejemplar de Berlín hubieron de transcurrir 80 años hasta que se hallase otro espécimen más. En 1956, en una cantera situada no muy lejos del lugar donde se había desenterrado el ejemplar de Londres, aparecieron restos fósiles de otro animal alado. Tras su análisis, Florian Heller, paleontólogo de la Universidad de Erlangen, llegó a la conclusión de que el fósil coincidía en todos sus rasgos con el ejemplar de Londres y que, por tanto, pertenecía a *Archaeopteryx lithographica*. Este fósil, de propiedad privada, estuvo depositado hasta 1974 en el Museo Maxberg, cercano a Solnhofen, motivo por el cual se le denomina ejemplar de Maxberg.





3. ESTA PLUMA SUELTA (*izquierda*) de *Archaeopteryx*, encontrada en el año 1860, es casi idéntica a las plumas de las aves modernas. Las semejanzas persisten incluso a nivel microscópico, como muestra este primer plano de las plumas de la cola del ejemplar de Berlín (*derecha*), aumentado aproximadamente un 500 por ciento. Los detallados fósiles de plumas de *Archaeopteryx* han llegado hasta nosotros gracias a la dureza y finura de grano de la caliza de Solnhofen, en Baviera.

El *Archaeopteryx* de Maxberg debió de permanecer flotando largo tiempo en el agua una vez muerto, ya que le faltan la cabeza y la cola; probablemente, se separaron del cuerpo del animal antes de que comenzase la fosilización. Las patas traseras y las alas se habían desplazado, perdiendo su posición original, pero —a juzgar por la orientación de las plumas— todavía estaban sujetas al cuerpo por tendones.

El cuarto ejemplar de *Archaeopteryx* entró en escena tras permanecer durante más de un siglo ignorado en el inventario del Museo Teylers de Haarlem, en Holanda. Fue extraído de una cantera en 1855 y, por tanto, su hallazgo es anterior al del ejemplar de Londres. Pero ya en 1857 se le clasificó erróneamente entre los pterodáctilos. En 1970 John H. Ostrom, de la Universidad de Yale, se dio cuenta de que sus características esqueléticas eran típicas de *Archaeopteryx*. El ejemplar está muy mal conservado: todo lo que queda son fragmentos de huesos del ala y brazo izquierdos, la pelvis y las extremidades traseras. No obstante, las uñas alares y las de las patas se hallan en perfecto estado de conservación.

También se erró en la identificación inicial del quinto ejemplar. Se encontró en una cantera de la zona de Eichstätt en 1951, cinco años antes de que se descubriese el ejemplar de Maxberg. Este esqueleto, aunque el menor de todos, nos ha llegado casi entero. Se le supuso un pequeño reptil similar a *Compsognathus*, dinosaurio del tamaño de un pollo. Hasta 1970 no fue reconocido como un *Archaeopteryx* por Franz X. Mayr, de la Universidad de Eichstätt, cuando, al iluminar lateralmente el fósil, observó la existencia de unas impresiones débiles correspondientes al plumaje de las alas y la cola.

El ejemplar de Eichstätt presenta el cráneo mejor conservado de todos los fósiles de *Archaeopteryx*. Gracias a tomografías computarizadas realizadas recientemente, se ha comprobado que la articulación del hueso cuadrado de la bóveda craneana es casi idéntica a la de las aves modernas. Basándose en la torsión retrógrada del cuello, en su posición —idéntica a la del ejemplar de Berlín— y en la buena conservación, se puede suponer que ambos animales sufrieron una muerte parecida.

Ciertamente, el ave de Eichstätt no murió de viejo; su limitado esqueleto sugiere que se trataba de un individuo juvenil. Los huesos del metatarso de los pies no muestran signos de fusión, como ocurre en otro espécimen de mayor talla, el ejemplar de Maxberg. Por otra parte, falta la fúrcula en un esqueleto que, por lo demás, está completo. La explicación más plausi-

ble considera que la fúrcula inmadura sería todavía cartilaginosa, no ósea, en el momento de la muerte y que, en consecuencia, no quedó fosilizada.

Otro rasgo característico del pequeño *Archaeopteryx* de Eichstätt concierne a sus extremidades traseras, relativamente largas. Su longitud indica que los huesos de las patas maduraban antes que los alares y de otras partes más del cuerpo. Los animales jóvenes podrían haber necesitado las extremidades traseras para la locomoción, tal vez porque la habilidad para volar no la desarrollaban hasta fases más tardías de su vida.

El sexto ejemplar de *Archaeopteryx*, último en descubrirse, entró en escena en 1987. Günter Viohl, conservador del Museo del Jura en Eichstätt, lo encontró en una colección de fósiles perteneciente a Friedrich Müller, ex-alcalde de Solnhofen. No mostraba ninguna impresión de plumaje y la mayor parte del cráneo se había perdido. En principio, a causa de sus largas y fuertes patas traseras y larga cola, se creyó que el fósil pertenecía a *Compsognathus*. En la actualidad, este fósil, propiedad del municipio de Solnhofen, se exhibe en el Museo del burgomaestre Müller.

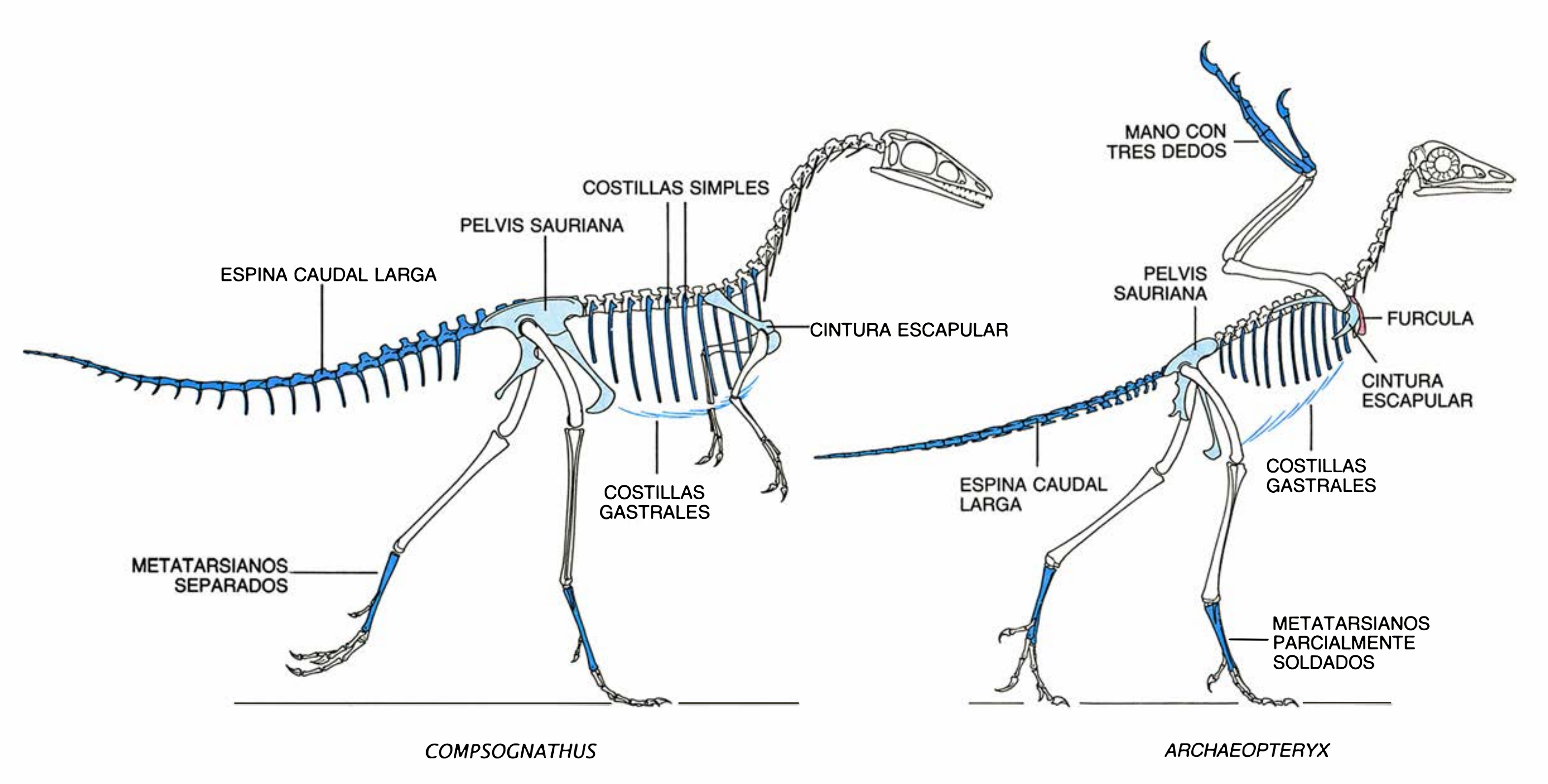
Todas las partes del cuerpo recuperadas del ejemplar de Solnhofen se encuentran en su posición natural, articulada. Iluminado lateralmente con foco de luz a bajo ángulo, el ala izquierda muestra unas impresiones, pequeñas y curvadas, del raquis de las plumas principales; igualmente, el borde externo de esta misma ala aparece bien perfilado por las impresiones. En el ala derecha y en la cola no aparecen estas marcas, pero ello podría deberse a la posición del esqueleto: el cadáver del ave prehistórica se habría hundido en el lagoon de Solnhofen sobre el costado izquierdo, de tal modo que su ala izquierda podría haber quedado profundamente anclada en el barro protector del fondo. Las corrientes habrían fácilmente arrancado las plumas de las partes sin proteger.

Del ejemplar de Solnhofen llama poderosamente la atención su talla. Tomando la longitud de las alas por base del cálculo, resulta un 10 por ciento mayor que el ejemplar de Londres —el mayor de los conocidos hasta entonces— y un 50 por ciento mayor que el pequeño ejemplar de Eichstätt. Este *Archaeopteryx* alcanzaba plenamente la talla de un pollo actual.

Antes de que uno pueda sacar conclusiones de los seis esqueletos fósiles (y la impresión de una pluma aislada), importa considerar una cuestión nuclear: ¿pertenecen todos estos restos a la misma especie? Su clasificación ha sido objeto de permanente controversia. En el transcurso de los años, los paleontólogos han asignado diversos nombres a estos especímenes, en un intento por agruparlos en diferentes especies e, incluso, en diferentes géneros.

La definición biológica de especie —grupo de poblaciones real o potencialmente interfecundas— carece de eficacia para el paleontólogo, quien no puede aplicar ese criterio a los individuos extinguidos hace mucho tiempo. A los paleontólogos no les suele quedar más remedio que definir las especies del pasado a partir de la morfología del esqueleto. Trabajando con una información incompleta, intentan discriminar entre lo que son caracteres diferenciadores de una especie y lo que son variaciones atribuibles a la edad, sexo y otros rasgos individuales. Una especie definida a partir de inferencias paleontológicas y otra identificada por criterios biológicos no son necesariamente idénticas.

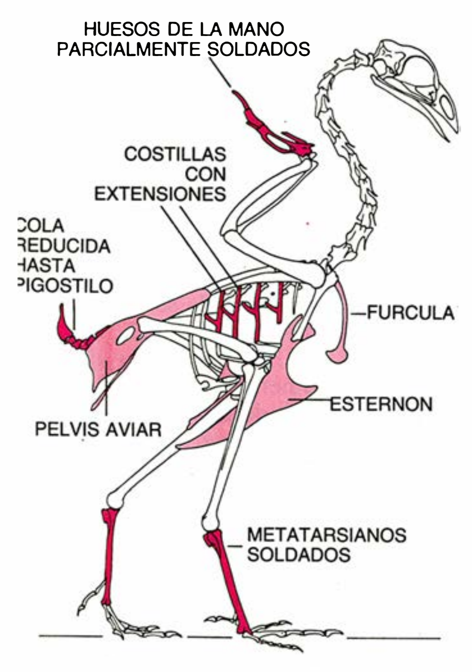
Parte del problema que plantea la clasificación de *Archaeopteryx* estriba en nuestro desconocimiento de sus pautas de desarrollo; tal como ha quedado registrado en el esqueleto,



4. DE LA COMPARACION ANATOMICA entre el pequeño dinosaurio *Compsognathus*, *Archaeopteryx* y un pollo doméstico actual deducimos hasta qué punto la evolución del vuelo llevó consigo cambios estructurales que afectaron a la totalidad del cuerpo y en los que, en esencia, los rasgos propios de aves (*en rojo*) se desarrollaron a partir de rasgos reptilianos (*en azul*). *Archaeopteryx* tenía las extremidades delanteras más largas que las de *Compsognathus*, pero los tres dedos móviles de la mano no eran cortos, ni estaban soldados como en las aves modernas. *Archaeopteryx* no poseía un esternón óseo, esencial para batir las alas vigorosamente; sí tenía una fúrcula. *Archaeopteryx*, al igual que *Compsognathus*, estaba provisto de

ignoramos si atribuirlo a un tipo reptiliano o al propio de un ave. Los reptiles crecen a lo largo de toda su vida (aunque el ritmo disminuye en edades avanzadas); las aves, al contrario, alcanzan rápidamente una talla adulta característica. En los reptiles, los centros de crecimiento se encuentran en las diáfisis de sus huesos huecos, mientras que en las aves jóvenes el crecimiento tiene lugar en unas gruesas terminaciones cartilaginosas de los huesos llamadas epífisis. Durante el estadio final del crecimiento de un ave, el cartílago de las epífisis se transforma en hueso, dejando una cicatriz que desaparece cuando el ave alcanza la madurez.

Ningún ejemplar de *Archaeopteryx* muestra cicatrices de ese tenor en los huesos huecos. Si el crecimiento de estos animales se produjo del mismo modo que en las aves, entonces los diferentes especímenes deberían corresponder a especies distintas. En cambio, si presentan el mismo modelo de crecimiento que los reptiles —hipótesis que se apoya en el predominio de los caracteres reptilianos en sus esqueletos— entonces todos los ejemplares podrían pertenecer a la misma especie y las variaciones corresponderían a meras diferencias de talla y edad. Los estudios recientes de Marilyn A. Houck y Richard E.



costillas gastrales (ventrales). La estructura del pie y de la cadera revelan que andaba con destreza. La cola no se había reducido hasta formar un pigostilo; podía servirle, pues, para equilibrar el peso del cuerpo cuando caminaba o corría.

Strauss, de la Universidad de Arizona, y Jacques A. Gauthier, de la Academia de Ciencias de California, apoyan la hipótesis según la cual los seis ejemplares de *Archaeopteryx* representan distintos estadios de crecimiento de una sola especie.

Estas consideraciones sobre sus rasgos esqueléticos y otras muchas sobre aspectos que aún se ignoran —por ejemplo, si los individuos que se conocen vivieron en épocas separadas entre sí cientos o miles de años, o si pertenecían a diferentes sexos— me llevaron a la conclusión de que todos esos fósiles debían clasificarse, pragmáticamente, como *Archaeopteryx lithographica*.

El aspecto de ave que ofrece *Archaeopteryx* plantea la cuestión obvia de si este animal podía o no podía volar. Resulta pertinente señalar aquí que ningún ejemplar muestra la existencia del esternón, ni siquiera el espécimen de Solnhofen, que es el mayor de todos y, probablemente, de edad adulta. Al parecer, *Archaeopteryx* no había desarrollado un esternón óseo, una estructura importante para el vuelo de las aves actuales.

El esternón de las aves modernas es una plataforma ósea arqueada y ancha que a menudo se extiende desde el tórax hasta la región pélvica y que durante el vuelo sirve de escudo protector y de sostén de los órganos internos. En la cara externa del esternón existe una cresta central que actúa de punto de anclaje de los músculos pectorales. Comparado con el resto del cuerpo, el tamaño de los músculos pectorales de las aves modernas no tiene parangón en ningún otro grupo de animales; estos enormes músculos capacitan a las aves para volar batiendo las alas.

No hay ningún indicio de que *Archaeopteryx* tuviese los músculos pectorales así desarrollados. En vez de esternón poseía unas costillas gastrales, o ventrales, como en sus antepasados saurios. Las costillas gastrales son delgadas y, lo mismo que ocurre con las espinas de los peces, envuelven el área abdominal sin estar sujetas al resto del esqueleto. Hoy día aún se encuentran en lagartos y cocodrilos y fueron relativamente comunes en los anfibios y reptiles primitivos. Las costillas gastrales quizás protegían la región abdominal y ayudaban a sostener los órganos internos de *Archaeopteryx*, pero sin duda no podían servir como puntos de inserción de los músculos pectorales.

No obstante, *Archaeopteryx* poseía una fúrcula similar a la de las aves reconocidas. En las aves modernas, parte de los músculos pectorales se fijan a esa estructura; por tanto, la fúrcula de *Archaeopteryx* podía haber servido como una pequeña área de inserción de dichos músculos. Sin embargo, su capacidad para el vuelo habría sido bastante limitada.

Existen otros indicios de que este ave prehistórica no sería buen animal volador. En las aves modernas, los sacos aéreos se extienden por el cuerpo desde los pulmones y alcanzan los huesos a través de unos orificios pequeños que normalmente se sitúan sobre los extremos superiores de los húmeros. Estos sacos aéreos potencian la capacidad respiratoria del ave y le ayudan a satisfacer la fuerte demanda de oxígeno que se produce durante el vuelo. Los huesos de *Archaeopteryx* carecen de orificios para los sacos aéreos; por tanto, resulta dudoso si el animal estaba o no dotado de unos pulmones parecidos a los de las aves.

Además, los huesos de la mano de *Archaeopteryx* no están soldados para permitir el soporte del ala, como ocurre en las aves modernas. Sus dedos podían moverse de forma independiente entre sí y estaban equipados con uñas fuertes y afiladas. Las plumas mayores de la mano se fijaban únicamente sobre el dedo central y las más grandes del brazo lo hacían sobre el cúbito, el mayor de los huesos del brazo. Sin embargo, el cúbito es liso, al contrario de lo que sucede en las aves actuales, en las que este hueso muestra unas pequeñas protuberancias sobre las que se fijan firmemente los ligamentos que sujetan las plumas principales. Por tanto, parece que las plumas mayores de *Archaeopteryx* no estaban ancladas en el esqueleto.

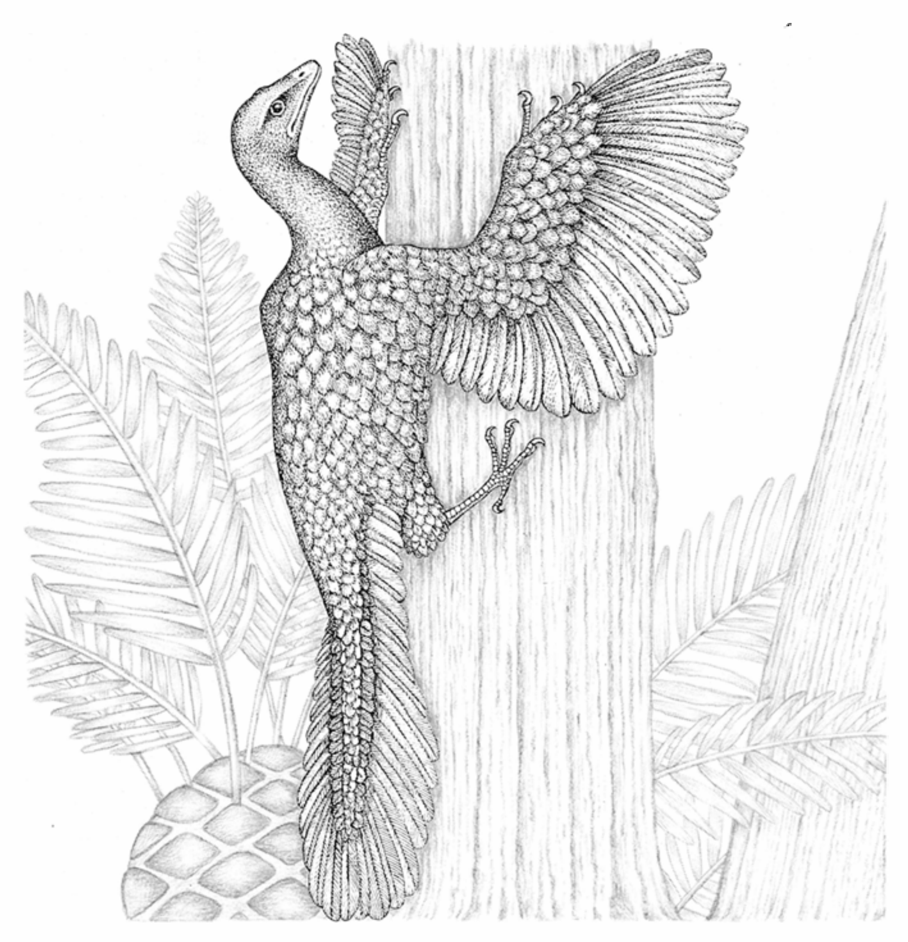
La imagen que, en conjunto, se perfila de *Archaeopteryx*, con músculos pectorales poco desarrollados, ausencia de un anclaje firme para las plumas principales y pulmones propios de reptil, es la de un mal volador.

Sin embargo, el plumaje perfectamente desarrollado de *Archaeopteryx* nos asegura que el animal volaba. Ningún otro vertebrado, aparte de las aves, está provisto de verdaderas plumas, y éstas debieron haber desempeñado un papel decisivo en la evolución del vuelo.

Se acepta hoy que las plumas han evolucionado a partir de las escamas de los reptiles. ¿Sirvieron las plumas, u otras estructuras similares, para aislar del frío a los dinosaurios de sangre caliente? ¿Protegieron del sol y del calor a los reptiles de sangre fría? ¿Fueron un reclamo utilizado para atraer a la pareja y competir con posibles pretendientes o formaron una



5. AUNQUE DEFICIENTE VOLADOR, según defiende la teoría arbocursorial de la evolución del vuelo, *Archaeopteryx* era capaz de lanzarse desde los árboles. El ave prehistórica aterrizaría al modo paracaidista para correr después hasta algún otro árbol cercano. (Dibujos de Patricia J. Wynne.)



6. TREPANDO **gracias a las afiladas uñas curvas de los dedos de manos y pies, *Archaeopteryx* podría haber ascendido a los árboles para iniciar un vuelo, aparearse o buscar alimento o refugio.**

especie de trampa para cazar insectos? Estas y otras ideas se han avanzado hasta ahora, pero ninguna sale del terreno de la mera especulación.

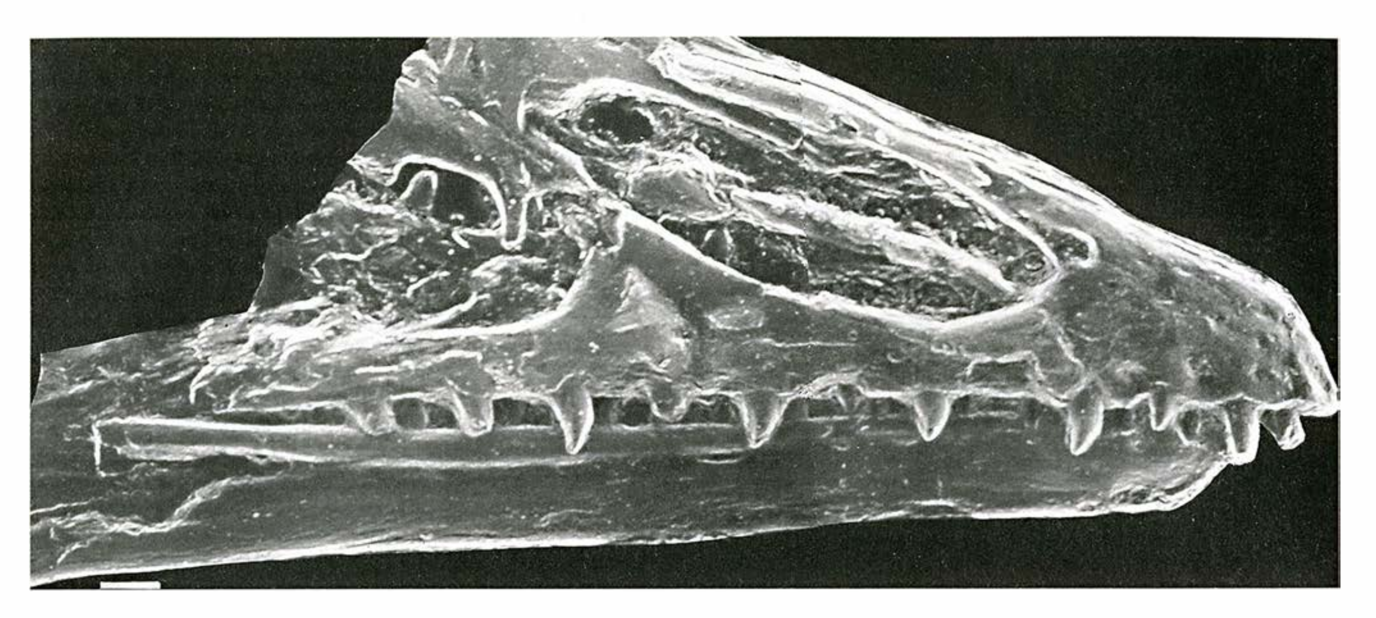
Tan sólo un punto es cierto: *Archaeopteryx* representa un estadio avanzado en la evolución del vuelo. Sus plumas principales muestran la asimetría y forma aereodinámica típica de las aves modernas. Esta semejanza prueba que las plumas de *Archaeopteryx* debieron de ser utilizadas para volar. Además, su forma sofisticada sugiere, de modo indirecto, que también el ancestro hipotético de *Archaeopteryx* debió de estar provisto de algún tipo de plumas, aunque, probablemente, no había llegado todavía a adquirir la capacidad de volar.

Aunque seguramente *Archaeopteryx* no fue capaz de volar distancias largas, sí que pudo efectuar vuelos cortos agitando las alas; debió de ser, además, un buen corredor. La propia estructura de la pelvis y de las patas traseras de este ave prehistórica sugieren que se movía con destreza sobre el suelo. Su pelvis recuerda el diseño trirradiado de la pelvis de los dinosaurios saurisquios, especialmente la de los terópodos bípedos como *Compsognathus*. Por tanto, los músculos pélvicos y los músculos de las extremidades traseras probablemente también eran parecidos a los de los saurios.

Al igual que *Compsognathus* y otros terópodos, *Archaeopteryx* se sostenía sobre las extremidades traseras. La postura de estos animales contrasta con la de las aves modernas, cuyo cuerpo, cuando los fémures están casi horizontales, queda suspendido de la pelvis a modo de columpio. Del mismo modo que le ocurría a *Compsognathus*, *Archaeopteryx* no caía inevitablemente hacia adelante gracias al contrapeso de su cola, casi tan larga como el cuerpo.

La cola era flexible cerca de la base, pero aumentaba en rigidez hacia la punta debido a las protuberancias óseas de las 23 vértebras caudales. Existen protuberancias similares a éstas en algunos dinosaurios bípedos y en los saurios voladores de larga cola de los períodos Triásico y Jurásico. La rigidez de la cola ayudaba al animal a mantenerse en equilibrio cuando, al correr o volar, efectuaba cambios bruscos de dirección. Además, el plumaje de la cola proporcionaba un plano horizontal estabilizante y aerodinámico.

En las aves modernas las vértebras caudales se han acortado y fusionado



7. HOCICO del pequeño ejemplar de *Archaeopteryx* de Eichstätt, Alemania Occidental, ampliado 6,5 veces en esta fotografía realizada con microscopio electrónico. Por presentar los dientes curvados hacia atrás, se le consideró *Jurapteryx recurva*. Tras estudios recientes de los huesos, parece ahora más probable que se trate de un individuo de la especie *Archaeopteryx lithographica* que murió antes de que hubiera alcanzado la madurez.

para formar el pigostilo, una de las escasas estructuras exclusiva de este grupo de animales. En los descendientes inmediatos de *Archaeopteryx*, el acortamiento de la parte caudal de la columna vertebral debió de haber ido acompañado de un desplazamiento gradual del centro de gravedad hacia la parte frontal. Para compensar parcialmente este desplazamiento hacia adelante, los músculos de la región pélvica se agrandaron, lo que implicó un aumento de la superficie de inserción de cada músculo sobre el hueso de la pelvis. Durante la reorganización de la pelvis, los dos huesos púbicos soldados se separaron y se orientaron hacia atrás. El papel de sostén de los órganos internos pasó entonces a cargo del esternón, que, simultáneamente, iba adquiriendo su propio desarrollo.

El pie de *Archaeopteryx* presenta una adaptación clara para la carrera y en él se observan rasgos intermedios entre reptiles y aves modernas. En los reptiles los huesos del metatarso del pie están separados, mientras que en las aves actuales se han soldado formando un solo hueso. Estudios del ejemplar de Maxberg con rayos X realizados por Wilhelm Stürmer, un físico y paleontólogo de la empresa Siemens en Erlangen, han revelado que los huesos metatarsianos estaban parcialmente soldados. En el mayor de todos los ejemplares, el de Solnhofen, la fusión de los huesos es aún mayor. Estas observaciones sugieren que en *Archaeopteryx* los metatarsianos se osificaban y soldaban con la edad.

Igual que ocurre en sus ancestros los terópodos, la estructura del pie de *Archaeopteryx* presenta, en conjunto, el mismo aspecto que el pie de un ave, con tres dedos largos y uno corto; este último, dirigido hacia atrás. La uña afilada y curvada del dedo posterior sugiere que este ave prehistórica podría haber sido capaz de agarrar objetos con las patas y colgarse en las ramas de los árboles.

En resumen, la evolución del vuelo estuvo acompañada de la reorganización de más estructuras que las esenciales para volar; los cambios afectaron a toda la fisiología y al esqueleto entero del animal.

Existen dos modelos básicos y contradictorios de la evolución del vuelo: el arborícola y el cursorial. Según el modelo arborícola, el vuelo que consistía en planeos batiendo las alas evolucionó en animales que trepaban por los troncos y saltaban por las ramas. El cursorial postula que el vuelo surgió entre animales bípedos que efectuaban pequeños saltos (para atrapar insectos, por ejemplo) al mismo tiempo que corrían agitando las extremidades delanteras para alargar sus saltos. Con el desarrollo progresivo de las estructuras de las alas, los saltos serían cada vez más largos y más altos, hasta que, con el tiempo, batiendo las alas, esos animales podrían persistir en la trayectoria de vuelo.

Se pueden hallar pruebas a favor de la teoría cursorial en las adaptaciones físicas de *Archaeopteryx* para la locomoción y la carrera. Sin embargo, las necesidades energéticas derivadas de correr y batir simultáneamente las alas serían muy altas, sobre todo en los estadios iniciales de la evolución del vuelo. Además, el levantarse volando desde el suelo implica luchar contra la gravedad, mientras que al lanzarse planeando desde los árboles se aprovecha dicha fuerza y se requiere menos energía.

El modelo arborícola asume que *Archaeopteryx* y sus antepasados eran capaces de trepar a los árboles. ¿Apoyan las uñas de *Archaeopteryx* esta idea? Sus uñas están curvadas en forma de hoz, con un borde cortante en la parte interior y material reforzante en la exterior. Uñas similares a éstas pueden encontrarse en los murciélagos, las ardillas y los pájaros carpintero —todos ellos animales que trepan por los troncos adhiriéndose a la corteza. Las uñas de las aves depredadoras y de animales corredores difieren bastante. Las aves actuales trepan utilizando exclusivamente las uñas de los pies; *Archaeopteryx*, en cambio, también podría haber usado para agarrarse las uñas de los dedos de las manos, en particular la del flexible primer dedo, mientras que con la cola obtendría un apoyo adicional.

Basado parcialmente en las ideas de Walter J. Bock, de la Universidad de Columbia, existe un tercer modelo, que combina rasgos de la teoría arborícola y de la teoría cursorial; podríamos denominarlo teoría arbocursorial o, de modo más descriptivo, teoría del corredor-trepador.

De acuerdo con la teoría arbocursorial, los predecesores de *Archaeop-*

teryx habrían sido reptiles pequeños, probablemente bípedos, que colonizaron los árboles durante el final del Triásico y principios del Jurásico, hace alrededor de 200 millones de años. Los bosques pudieron servirles de refugio y lugar donde construir nidos y cuidar las crías; también pudieron representar ventajas en la búsqueda de alimentos. El comienzo de la vida arborícola en estas protoaves estuvo relacionado, probablemente, con su evolución hacia organismos de sangre caliente y con el desarrollo simultáneo de estructuras plumosas que eran aislantes y permitían mantener la temperatura corporal constantemente alta. La vida en los árboles también habría favorecido el desarrollo de una visión estereoscópica y de la capacidad de orientarse en un espacio tridimensional, destrezas que constituyen requisitos previos para la posibilidad de volar.

En los saltos desde los árboles hasta el suelo, las plumas grandes y resistentes al aire, particularmente las que se sitúan en las extremidades anteriores, al ralentizar el descenso, habrían amortiguado los aterrizajes. El planeo podría haber evolucionado a partir de estos descensos lentos, mientras que la capacidad de mantener una trayectoria de vuelo se conseguiría batiendo las alas.

Considerando que los pies de *Archaeopteryx* están adaptados para la carrera, tanto en este ave prehistórica como en las protoaves que le antecedieron, la capacidad para moverse por el suelo debió de ser importante. El planeo desde unas ramas a otras requiere precisión en la dirección y esta habilidad, a su vez, necesita de una gran coordinación. Por tanto, para las aves primitivas, los aterrizajes simples sobre el suelo, a modo de saltos en paracaídas, serían mucho más fáciles de controlar que los complicados vuelos entre ramas. Una vez alcanzado el suelo, los animales se dirigirían hacia otro árbol, trepando en búsqueda de insectos, un lugar para anidar o refugio.

¿Fue *Archaeopteryx* el antepasado de todas las aves posteriores? Partiendo de los fósiles que aparecen en el período siguiente, el Cretácico, ¿qué puede deducirse acerca de la evolución de las aves? Los únicos esqueletos relativamente completos pertenecen a la parte superior de dicho período (hace aproximadamente 85 millones de años). Aquellas aves, provistas de dientes, estaban parcialmente adaptadas a un modo acuático de vida, que incluía la capacidad de bucear. Parece muy poco probable que unas formas tan especializadas hayan descendido directamente de *Archaeopteryx*. En consecuencia, *Archaeopteryx* se ha considerado a menudo una rama evolutiva ciega en el desarrollo de las aves.

Sin embargo, recientemente se han hallado fósiles de aves del Cretácico inferior (es decir, de hace unos 125 millones de años) que parecen representar un estadio intermedio entre *Archaeopteryx* y las aves modernas. En particular, el esqueleto de una pequeña ave hallado en 1984 en la caliza de Las Hoyas, en la parte centro-oriental de España, presenta una combinación de caracteres primitivos y modernos. La pelvis y las extremidades traseras parecen más reptilianas que las de las aves de hoy; los hombros y la fúrcula resultan más modernos que los de *Archaeopteryx*. La característica más intrigante, no obstante, radica en el pigostilo, que presenta 15 vértebras soldadas. Es más largo que el pigostilo de las aves actuales (que tiene de cuatro a diez vértebras soldadas), pero más corto que la cola de *Archaeopteryx* (con 23 vértebras).

El ave de Las Hoyas, como ocurre con el propio *Archaeopteryx*, demuestra que la evolución temprana de las aves estuvo estrechamente condicionada por las necesidades físicas del vuelo. No nos es permitido todavía decir si *Archaeopteryx* fue o no el antepasado directo del ave de Las Hoyas y de todas las demás aves, pero esta hipotética correlación no es de primera importancia. Lo que resulta significativo es que la pluma suelta y los seis esqueletos que se conocen de *Archaeopteryx* proporcionan pistas para entender la evolución de las aves. Como dijo en 1957 Adolf Portmann, zoólogo de la Universidad de Basilea, acerca de estos fósiles: "Representan documentos sin los cuales la idea de la evolución no sería tan poderosa."

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

IT STARTED IN THE JURASSIC: THE FASCINATING PHYLOGENY OF BIRDS. Alan Feduccia. Gerstenberg Verlag, 1984.

THE BEGINNINGS OF BIRDS. *Proceedings of the International* Archaeopteryx *Conference, Eichstätt, 1984*. Dirigido por Max K. Hecht, John H. Ostrom, Günter Viohl y Peter Wellnhofer. Freunde des Juramuseums, 1985.

A NEW SPECIMEN OF *ARCHAEOPTERYX*. Peter Wellnhofer en *Archaeopteryx*, vol. 6, págs. 1-30; 1988.

¿Hacia dónde va el transporte?

La automoción pone la mirada en la alta tecnología para crear un vehículo eficaz

Karen Wright

En la industria de automoción están viviendo el mejor y el peor de los momentos. Desde Detroit a Stuttgart, Tokio, París, Turín y Seul, los fabricantes han de hacer frente a una conspiración de problemas, planteados a escala planetaria, comparada con la cual, la crisis energética de mediados del decenio de 1970 parece un simulacro de incendio. Jamás ha sido tan agresiva la competencia entre fabricantes; jamás ha sido tan grave la congestión circulatoria de las ciudades de todo el mundo. Y ahora que la industria se ha avenido —por fin— a aceptar las normas sobre emisiones contaminantes establecidas años ha, la amenaza de calentamiento del globo está apuntando con su dedo acusador a otro malvado: el dióxido de carbono, enemigo al que ningún convertidor catalítico puede vencer.

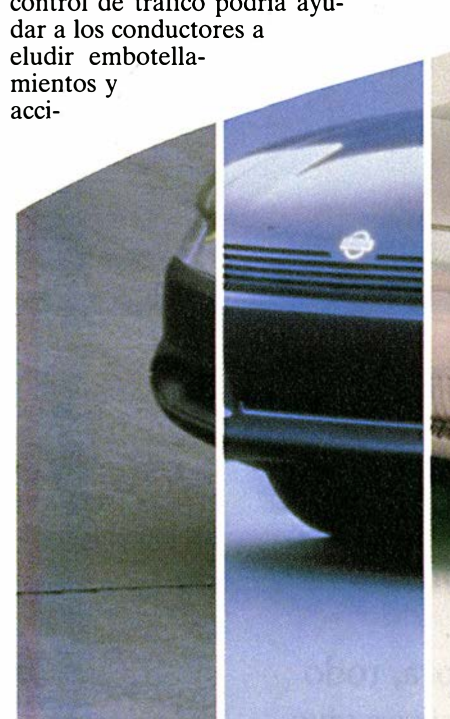
Y, sin embargo, la industria de automoción cabalga en la cresta de una ola tecnológica. Los nuevos materiales, los nuevos diseños y los nuevos artilugios, muchos de ellos resultado de iniciativas conjuntas con las industrias de aeronáutica y de electrónica, ofrecen posibilidades que ningún fabricante de automóviles puede permitirse desdeñar. Otros tipos de motores y combustibles podrían aliviar el impacto del automóvil sobre la calidad del aire urbano, sin sacrificar la utilidad o las prestaciones del vehículo. Merced a materiales más ligeros, se podría mejorar la economía del combustible, reduciendo los rozamientos en el motor. Y carrocerías más aerodinámicas, al eliminar turbulencias, podrían, a un tiempo, aumentar el rendimiento y facilitar la conducción.

Tal vez la solución menos ortodoxa llegue desde la electrónica. Quién sabe si la conjunción de autovías "inteligentes" y de vehículos más inteligentes aún podrán diluir la neblina de humo que cubre las ciudades, al hacer más rápidos los viajes y reducir los tiempos de funcionamiento en punto muerto. Un sistema de comunicaciones instantáneas con los centros de control de tráfico podría ayudar a los conductores a eludir embotellamientos y accidentes. A bordo de los automóviles, mapas digitales que muestren la posición del vehículo y del punto de destino podrían orientar al viajero que atraviesa un territorio desconocido. E incluso el más avezado de los residentes en ciudades-dormitorio podría beneficiarse de la potencia de cómputo de un microprocesador para evaluar el estado del tráfico y calcular la ruta más rápida de casa al trabajo a la ida o la vuelta.

Hacia el coche no contaminante

Hasta hace poco, la historia de la tecnología de automoción se resumía en una convergencia. En 1895, un automóvil Panhard-Levassor ganaba la gran carrera París-Burdeos-París, demostrando así la viabilidad del vehículo propulsado por gasolina. No obstante, a la vuelta de siglo, el 40 por ciento de los automóviles estadounidenses eran de vapor; el 38 por ciento, de propulsión eléctrica: sólo un 22 por ciento usaba gasolina. Entonces, en 1901, la erupción del pozo Spindletop, cerca de Beaumont (Texas), y el descubrimiento de vastas reservas petrolíferas en el subsuelo norteamericano impulsaron al motor de gasolina (y a los Estados Unidos) hasta situarlo en cabeza de la industria automovilística.

Es muy posible que, durante los últimos 20 años, los fabricantes de automóviles hayan añorado aquellos días exultantes, al ir los países desa-



1. ESTE MONTAJE fotográfico revela un cierto parentesco en los diseños aerodinámicos de fabricantes franceses, japoneses y norteamericanos. Los fabricantes de todo el mundo han de hacer frente a normas cada vez más estrictas de seguridad y contaminación; algunas de las soluciones de la industria son parecidas, pero la tecnología ha ensanchado el abanico de posibilidades.

rrollados instituyendo normas cada vez más estrictas de seguridad y rendimiento. En los Estados Unidos, dos iniciativas legislativas establecen el contexto regulador para los fabricantes de ese país y para los de otros que pongan sus miras en el mayor de los mercados automovilísticos del mundo. La normativa sobre consumo medio de combustible en sociedades anónimas (CAFE, siglas de "Corporate-Average Fuel Economy"), establecida en 1975, estipula que los fabricantes han de mantener un rendimiento de consumo de unos 9,1 litros cada 100 kilómetros en sus parques automovilísticos nacionales y extranjeros. El Acta de Aire Limpio (Clean Air Act) de 1970, que pronto será enmendada, limita las emisiones permisibles de hidrocarburos, de monóxido de carbono y de los óxidos de nitrógeno emanados del tubo de escape.

Dichas medidas han logrado ya rendimientos mucho más altos de los descendientes del motor de cuatro tiempos, original de Nikolaus Otto. Desde 1970, las emanaciones de los tubos de escape de los vehículos nuevos han disminuido en un 96 por ciento, y la eficiencia media de consumo de combustible de un vehículo nuevo se ha duplicado.

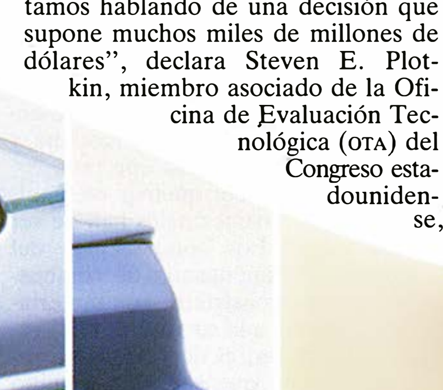
Ello no obstante, el transporte, que consume más del 60 por ciento del petróleo utilizado en los Estados Unidos, sigue siendo responsable del 40 por ciento del total de emisiones de hidrocarburos y de dos tercios de las emisiones de monóxido de carbono. Así que los escapes de los automóviles continúan en el punto de mira. "Al parecer somos el blanco más a mano", comenta Robert A. Frosch, vicepresidente encargado de los laboratorios de investigación de General Motors.

Es posible que entre las enmiendas al Acta de Aire Limpio figuren disposiciones que exijan la introducción de automóviles no contaminantes. Por fortuna, no carecemos de combustibles capaces de sustituir a las gasolinas. Las tres grandes compañías de Detroit (General Motors, Ford y Chrysler) tienen, desde hace tiempo, programas de estudio de las posibilidades del metanol, el etanol, el gas natural y la electricidad, amén de un interés marginal por el hidrógeno y los gases licuados destilados del petróleo.

Los fabricantes japoneses no se han dormido, y han tomado la salida a la carrera. A últimos de 1989, Nissan había facilitado a la Comisión de Energía de California un prototipo de vehículo capaz de funcionar con gasolina o con metanol. Este mes, Toyota y Mitsubishi efectuarán experimentos con automóviles no contaminantes en Nagoya; Nissan e Isuzu proyectan ensayar prototipos de vehículos en Yokohama. Los camiones de recogida de basuras de Tokio y Osaka ya funcionan con metanol.

Por lo general, los programas europeos han ido a la zaga de los esfuerzos de estadounidenses y japoneses, pero los fabricantes comenzaron a hacer de tripas corazón y mostrar algún entusiasmo por la investigación en vehículos "limpios" cuando la Comisión de las Comunidades Europeas impuso el año pasado normas más estrictas sobre emisiones contaminantes. Muy recientemente, Francia anunció una inversión de 1200 millones de francos (unos 24.000 millones de pesetas) en automóviles no contaminantes, financiada conjuntamente por el gobierno, Peugeot y Renault (esta última, de propiedad estatal). Por su parte, Volkswagen y su nuevo socio germano-oriental, IKA-Kombinat, afirmaron que proyectan construir automóviles no contaminantes destinados al mercado europeo. Y Fiat se encuentra en el segundo año de su compromiso a tres años de invertir 1,2 billones de liras (algo más de 100.000 millones de pesetas) en medidas de protección del medio; entre ellas, la instalación gratuita de convertidores catalíticos.

Lo que de verdad falta es un acuerdo sobre cuál de las diversas opciones tecnológicas será la vencedora. "Estamos hablando de una decisión que supone muchos miles de millones de dólares", declara Steven E. Plotkin, miembro asociado de la Oficina de Evaluación Tecnológica (OTA) del Congreso estadounidense,



Nikolaus A. Otto (Alemania) exhibe un **motor de émbolo** de cuatro tiempos

BENZ

Panhard & Levassor (Francia) construye un **automóvil de cuatro ruedas**

1876 **1886** **1891**

Carl F. Benz (Alemania) patenta un **triciclo a motor**



que está preparando un estudio sobre combustibles. "Hay gente alineada en cada bando, luchando. La única forma de superar este conflicto es conseguir datos impecables." Plotkin afirma que, en los Estados Unidos, tan sólo se han efectuado tres estudios, con un total de cuatro vehículos, que hayan detallado las contribuciones a la formación de ozono de cada uno de los 20 a 30 compuestos emitidos por los tubos de escape.

Metanol: en cabeza por una manguera

Los expertos, sin arredrarse, están decantando sus posiciones. Hasta el momento, quienes más alto claman son los partidarios del metanol [véase "El metanol, un combustible alternativo", por Charles L. Gray y Jeffrey A. Alson; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1990]. El metanol tiene una combustión más limpia que la gasolina y produce por kilómetro sólo una décima parte de las emisiones de hidrocarburos de ésta, según datos de la Agencia de Protección Ambiental. Puede obtenerse del gas natural (metano) o del carbón, abundantes ambos tanto en los EE.UU. como en muchos otros países. Su índice de octanos es superior al de la gasolina y entrega mayor potencia que ésta.

Mas, para poder quemar metanol, los coches convencionales han de ser rediseñados. Los componentes del sistema de alimentación de combustible han de construirse con materiales resistentes a la corrosión. Para resultar prácticos, el depósito de combustible tiene que ser, por término medio, bastante mayor que el depósito de gasolina medio, pues el metanol posee un 40 por ciento menos de energía por litro que la gasolina.

Además, la combustión del metanol libera formaldehído, un posible agente cancerígeno. La preocupación suscitada por los efectos potencialmente nocivos de las emisiones de formaldehído han inducido hace poco al ministerio japonés de industria y comercio exterior a financiar un estudio de tres años de duración, presupuestado en 1250 millones de yenes (unos 900 millones de pesetas). Cierto es que los motores de gasolina también producen formaldehído, pero en menor medida. Hasta ahora, en los EE.UU., únicamente el estado de California ha puesto tope a las emisiones de formaldehído permisibles en la boca del tubo de escape.

El etanol es pariente próximo del metanol y comparte muchos de sus atributos e inconvenientes, sin faltar la producción de formaldehído. General Motors, Fiat, Saab, Scavia, Volvo y Mercedes-Benz poseen considerable experiencia en la fabricación de autos propulsados por etanol para el mercado brasileño, país que comenzó la transición a combustibles alcohólicos en 1975.

Pero tanto la popularidad del me tanol como la del etanol sufren de l que Daniel Sperling, de la Universi dad de California, ha denominad "estasis huevo-gallina". Los provee dores no están dispuestos a instala surtidores para combustibles que ape nas tienen demanda, y los automovi listas no están dispuestos a compra automóviles para los cuales no ha surtidores.

La solución de la industria a est "estasis" es el vehículo de "combus tible variable", un coche capaz d funcionar con gasolina, metanol, eta nol o cualquier combinación de lo

Los anuncios de coches recogen el espíritu de una industria y la evolución de la actitud de los consumidores

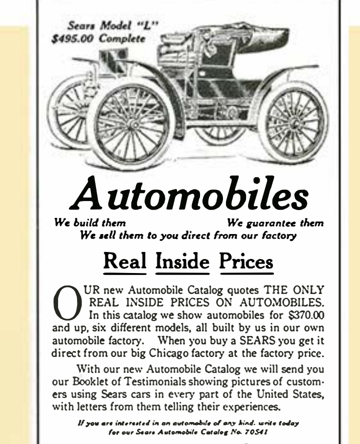
LLEGARON Y PASARON

El automóvil debe parte de su mística al arte de la presentación original e imaginativa.

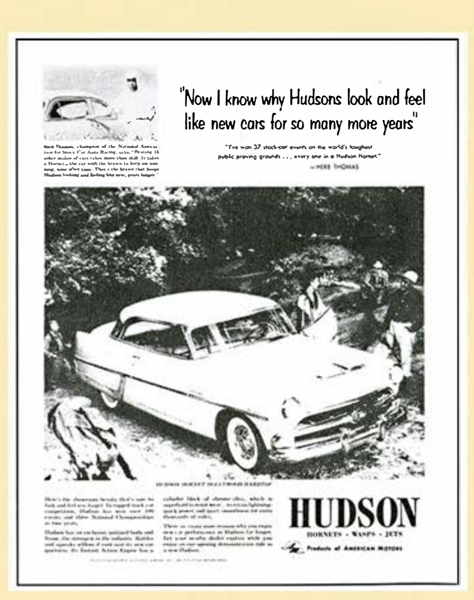
A lo largo de los años, los anuncios han venido documentando las cualidades que la gente más admira en sus coches.

Algunas campañas publicitarias fueron signos de los tiempos: los panegíricos de antaño a motores sedientos de gasolina se tornaron en baladas a la sobriedad en el decenio de 1970; el "hombre" que poseía un Packard sería hoy meramente una "persona".

El atractivo de otras tendencias es intemporal: los usuarios siguen respondiendo al simbolismo de rango social que el automóvil comporta, a su carácter de inversión y de entretenimiento auténtico (ya que no limpio).—*K.W.*



1910



1954

George B. Selden (EE.UU.) diseña un **automóvil propulsado por gasolina**


COLUMBIA


OLDSMOBILE

Estados Unidos organiza las primeras **trampas contra la velocidad** (límite: 32 km. por hora)

1892 **1895** **1900** **1903** **1905**

Rudolph C. K. Diesel (Alemania) patenta un **motor de compresión-ignición**

SELDEN


La Compañía R. E. Dietz (Estados Unidos) introduce **faros** de keroseno

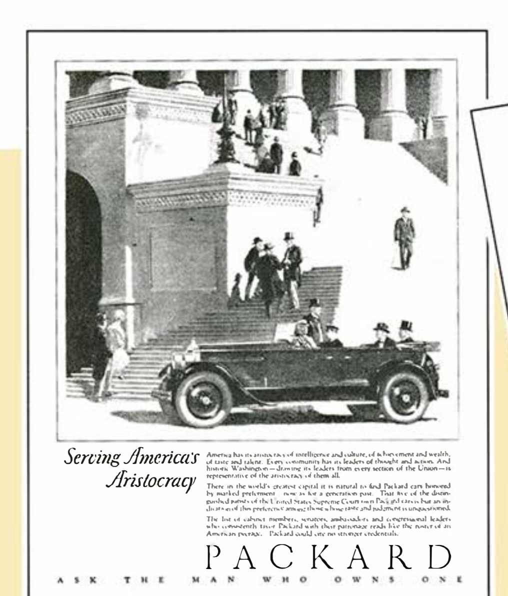
Es denunciado el primer **robo de automóvil**, en San Luis

tres. Tales automóviles tienen un sensor óptico en el depósito de combustible, que determina la composición de la mezcla. El sensor transfiere esa información a un módulo de control del motor, que se encarga de graduar la relación aire/combustible y otros parámetros de funcionamiento.

Circuitos urbanos

A pesar de haber protegido sus apuestas con el vehículo de combustible variable, los fabricantes siguen sin lanzarse a sacar coches que funcionen con nuevos combustibles. "Tenemos que empezar a preocuparnos en serio por la comercialización", dice Nichols, de Ford. Por muchos conceptos, ser el primero en salir a escena con un vehículo de nuevo combustible podría no constituir una posición envidiable. Después de más de un decenio de investigación en combustibles alcohólicos, casi todos los fabricantes disponen de suficientes recursos técnicos para igualar cualquier innovación de la competencia.

Los vehículos eléctricos sufren de la misma desventaja comercial. Muchas veces se nos han prometido tales vehículos, pero pocas se han entregado. Parece que este año los fabricantes han decidido desempolvar sus notas de laboratorio y volver a intentarlo. Peugeot y Fiat han anunciado su intención de sacar al mercado europeo coches eléctricos de pasajeros para uso particular.



1926



1937



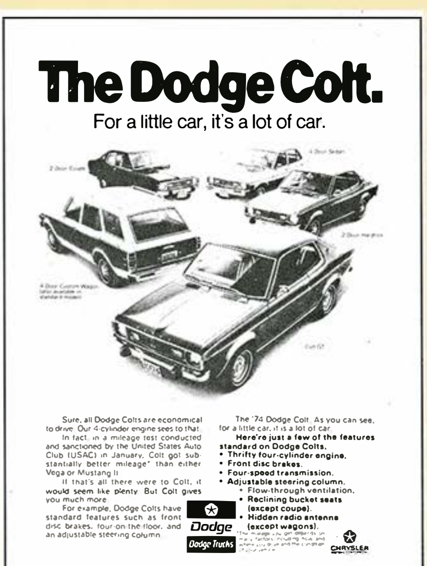
1949



1962



1965

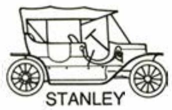


1974

Se desarrollan **parachoques** de muelles

FORD

Se construye en Detroit, Michigan, la primera **gasolinera** donde se entra en automóvil



Se erige en Detroit la primera **señal de stop**

1906 **1908** **1910** **1911** **1914** **1916**

La Ford Motor Company (Estados Unidos) presenta el **Modelo T**

Introducción del **arranque eléctrico**



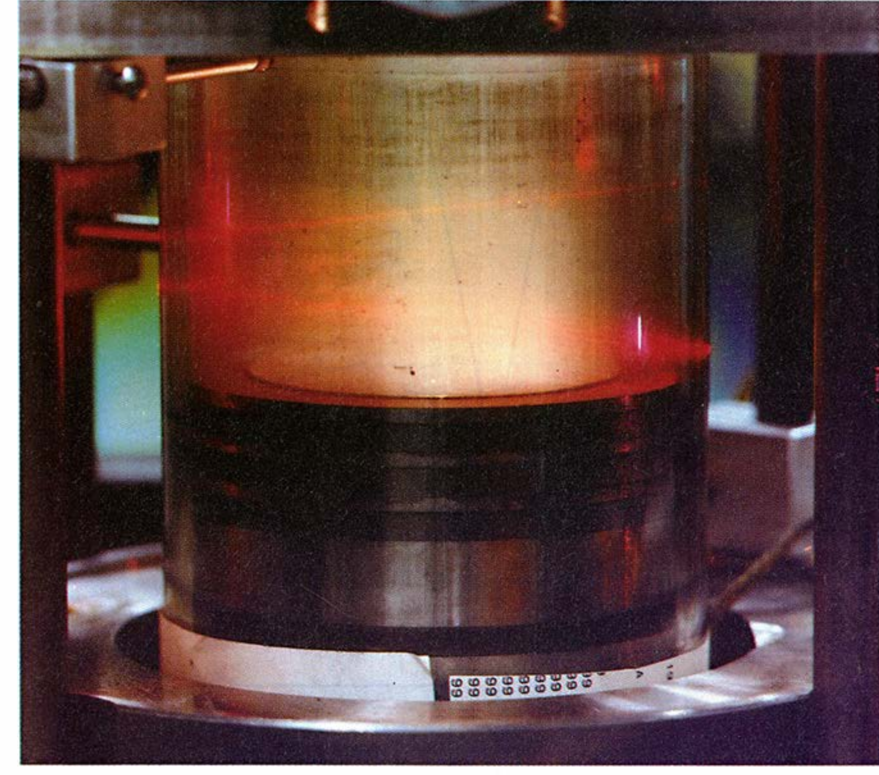
El Acta Federal de Ayuda a las Carreteras (EE.UU) establece una **red de carreteras nacionales**

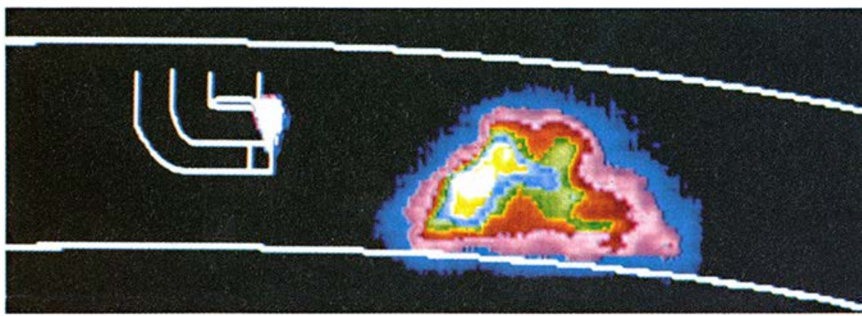
Hasta los abogados de la tecnología opinan que los coches eléctricos no tendrán mucho atractivo, aparte de ciertas aplicaciones comerciales limitadas. "Todavía no sabemos cómo construir las baterías de un coche verdaderamente bueno, un coche de uso general", señala Frosch, del centro técnico de General Motors. La batería de plomo y ácido del Impact le proporciona al vehículo una autonomía de unos 190 kilómetros a 90 kilómetros por hora, que es casi su velocidad máxima. La batería, que probablemente costaría por sí sola unos 1500 dólares (unas 165.000 pesetas), requiere 6 horas de recarga y, según General Motors, sería preciso reemplazarla hacia los 30.000 kilómetros de servicio.

Muchos fabricantes de automóviles, amén de compañías químicas y eléctricas, investigan las baterías sodio-azufre y las baterías níquel-hierro, que podrían tener una vida útil más larga. No obstante, la recarga sigue siendo el gran inconveniente, y los viajes largos habrían de ser descartados por completo. Por este motivo, algunos fabricantes proponen un híbrido. "Estamos explorando las posibilidades de sistemas de tracción bimodales, en los que coexistirían la tracción eléctrica con un motor térmico convencional, con el fin de atender tanto a las necesidades del viaje urbano como a los de larga distancia", declara Paolo Scolari, director de diseño y desarrollo en Fiat.

Los vehículos eléctricos han sido descritos como el "Santo Grial" de los vehículos alternativos, porque no producen emisiones. Pero tal denominación podría no estar justificada. La energía de las baterías ha de proceder de algún sitio; si la fuente es una central eléctrica que quema carbón, petróleo o gas, lo único que estarían haciendo los coches eléctricos es remontar a un nivel más alto el "error de los combustibles fósiles".

El único combustible verdaderamente limpio es el hidrógeno, cuya combustión sólo produce vapor de agua. Diversos fabricantes, y de forma muy distinguida, los europeos y japoneses, están persiguiendo ávidamente la tecnología necesaria para los motores de hidrógeno. Pero los combustibles gaseosos como el hidrógeno y el gas natural plantean problemas en las aplicaciones de automoción, porque resultan difíciles de almacenar a bordo de un vehículo. Difícil, pero no imposible. Hace años que se construyeron con éxito prototipos propulsados por hidrógeno, muy notablemente por Daimler-Benz. Alrededor del 10 por ciento de los coches de Nueva Zelanda funcionan con gas natural.





2. UN CILINDRO TRANSPARENTE de un motor de émbolo (arriba) *permite a los científicos de los Laboratorios de Investigación de General Motors comprender mejor los procesos de combustión. La propagación de la llama por la cámara desde la bujía (la* L *de la figura inferior) se registra mediante ordenadores. Los arcos curvos representan el techo de la cámara y la cara superior del émbolo.*

Motoingenio

A pesar de todo el interés dedicado a los nuevos combustibles, no es probable que el motor de gasolina haga mutis a corto plazo. Los 300 expertos en automoción consultados en 1988 por David E. Cole y sus colegas, del Instituto de Investigación del Transporte, dependiente de la Universidad de Michigan (UMTRI), para su pronóstico "Delfos" (como el oráculo) bianual, predecía que, hacia 1995, utili-

Se instala en Detroit el **primer semáforo tricolor**

1919

STUTZ

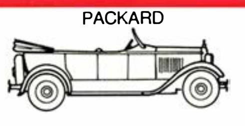
1921

Los coches de serie empiezan a llevar **indicadores de dirección**

Se ponen a la venta cristales de seguridad; se establece el **índice de octanos** para las gasolinas

1926

PACKARD



Cadillac (EE.UU) introduce el **cambio de marchas sincronizadas**

1928

Se construye en Woodbridge (Nueva Jersey) el primer **enlace en bucle** entre carreteras

1930

1931

Desarrollo de los primeros **servofrenos**

En Camdem (Nueva Jersey) se abre el primer **autocine**

1933

zarían los nuevos combustibles entre un 10 y un 18 por ciento de los vehículos producidos en Norteamérica.

"Esto parece la pesadilla de un ingeniero", me dice Nicholas E. Gallopoulos, en uno de los laboratorios de la división de investigación de motores del Centro Técnico de General Motors. "Y por muchos conceptos, lo es." La causa de su sarcasmo es un embrollado amontonamiento de cables multicolores, correas y estructuras de acero que casi llena la mitad inferior de la sala. Se trata de un facsímil de un motor de émbolo, capaz de funcionar como tal, que facilita a los investigadores el estudio de los procesos de combustión durante los milisegundos consecutivos a la chispa eléctrica que inicia la ignición.

La pieza central de esta exuberante y enmarañada *piece d'auto* la constituye un único cilindro cuyas paredes son de zafiro transparente. Cuando funciona el motor, el proceso de combustión se "observa" a través de las paredes del cilindro mediante ordenadores provistos de sensores ópticos. Los modelos como esta célula de zafiro permiten a los investigadores aprender a mejorar el rendimiento del motor. El instante, la duración y la ubicación de la chispa de encendido, el tamaño y forma de la cámara de combustión, el número y la disposición de las válvulas y la turbulencia creada en la mezcla de gas y aire son datos todos ellos capaces de afectar a la forma en que arde el combustible.

La comprensión minuciosa del proceso de combustión ha influido ya en el desarrollo de motores multiválvula, de turbocompresores de geometría variable y de sistemas de inyección electrónicamente controlada del combustible. Los adelantos en sistemas de transmisión, como la transmisión de relación continuamente variable (que permite al motor funcionar en un régimen óptimo cualquiera que sea la velocidad), contribuirán también a mejorar las prestaciones y el rendimiento del motor tradicional de cuatro tiempos.

Los ingenieros se esfuerzan por hacer funcionar los motores térmicos con relaciones aire-combustible menores de las teóricamente óptimas. Estos motores de "mezcla pobre" bloquearían la contaminación en su misma fuente. Pero las empresas han comenzado a explorar posibles sustitutos del motor tradicional y, cuando lo hacen, la frase que más frecuentemente les viene a los labios es "motor de dos tiempos".

El motor de dos tiempos ha venido utilizándose desde hace decenios en motocicletas, motores fuera-borda, motosierras y pequeños generadores de electricidad. Como su nombre indica, este motor efectúa en dos tiempos lo que el motor clásico de gasolina en cuatro. En vez de asignar un viaje del émbolo a cada uno de los ciclos de admisión, compresión, expansión y escape, el motor de dos tiempos realiza a la vez la admisión y compresión en un ciclo, y la expansión y el escape en el otro. Dado que una de cada dos emboladas corresponde a expansión, el diseño en dos tiempos podría ser, en principio, mucho más eficiente que el de cuatro.

Empero, en la práctica, da muestras de ciertas manías fastidiosas. Consume aceite y escupe combustible sin quemar, y como nos recuerdan sin cesar las motos ligeras, son muy ruidosos. Salvo en Alemania oriental, por cuyas carreteras circulan miles de autos Wartburg o Trabant dejando en pos nocivas estelas de humo azulado emanadas de sus motores de dos tiempos, estos motores han quedado relegados a aplicaciones especiales.

El motor de dos tiempos contraataca

Hace pocos años, el desarrollo de una nueva tecnología de inyección de combustible eliminó los atributos indeseables del motor, y le proporcionó una ventaja en el consumo de combustible de un 25 por ciento sobre motores equiparables de cuatro tiempos. El más distinguido innovador y paladín del motor de dos tiempos es un australiano; Ralph T. Sarich, multimillonario por sus negocios inmobiliarios, preside la Orbital Engine Company en Perth. El motor de dos tiempos fabricado por Orbital tiene un tamaño y peso que son aproximadamente la mitad de los correspondientes a un motor de automóvil ordinario. Y como tiene menor número de piezas, el motor Orbital cuesta un 25 por ciento menos de fabricar, según la compañía.

Sarich asegura haber tenido éxito en lograr que las emanaciones de su motor sean sensiblemente inferiores a las actuales limitaciones estadounidenses, meta que no han logrado alcanzar muchas otras compañías. Ford y General Motors, por ejemplo, han estado trabajando durante años en motores de dos tiempos sin lograr resultados comparables.

También Peugeot y el Instituto Francés del Petróleo han diseñado conjuntamente un motor de dos tiempos. "Desde el punto de vista de rendimiento, contaminación y sencillez, el motor es magnífico", dice André Douaud, del Instituto. "Pero, ¿podremos producirlo a gran escala?" Es muy posible que Toyota se esté haciendo la misma pregunta acerca de su prototipo de dos tiempos. El motor japonés, de tres litros, es mucho más complicado que la versión de Sarich y está orientado al mercado de automóviles de lujo.

Entretanto, Sarich ha firmado un acuerdo para comenzar a producir en 1991 los primeros Orbital de dos tiempos, en Tecumseh, Michigan. Sarich sueña con un mundo que funcione en dos tiempos; otras personas tienen distintas visiones. "No va a ser éste el sistema que desplace por completo de la noche a la mañana a cualquier otro tipo de motor", advierte Ian MacPherson, director de investigación en transmisiones de la empresa Ford. "No sabemos si a la gente le va a gustar; no sabemos si dará la talla en cuanto a fiabilidad y kilometraje."

"Desde nuestro punto de vista, el incentivo está en su versatilidad y compacidad", declara Paul E. Reinke, ingeniero de desarrollo en General Motors. Señala que el motor de dos tiempos puede ser unos 15 o 20 centímetros más corto que el motor tradicional, porque carece de válvulas y árbol de levas. Al ser de planta más baja, se adapta bien a los diseños aerodinámicos bajos de morro de los que el mercado parece hoy tan enamorado.

Pero MacPherson opina que los fabricantes podrían obtener mayores retornos de sus inversiones si se esforzasen por mejorar las tecnologías conocidas, como la del motor diesel. De hecho, los fabricantes europeos y japoneses están trabajando con ahínco para reducir las emisiones de par-

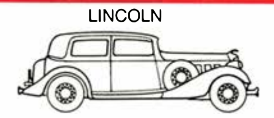


Se ofrece en los coches de serie la **suspensión independiente** en las ruedas delanteras

SEGUNDA GUERRA MUNDIAL

1934 **1935** **1940** **1944**

Aparece en Oklahoma City el primer **parquímetro**



Introducción de las **transmisiones automáticas**



Los Estados Unidos crean un sistema de **autovías interestatales**

tículas de los escapes diesel, que les permita sobrevivir con normativas más estrictas sobre control de emanaciones.

Ganancias en material

Le toca después el turno a la recalcitrante turbina. "Hay mucho que decir en favor de la prosecución del desarrollo del motor de turbina de gas", señala MacPherson, aunque admite que tales motores no llegarán a ser prácticos en los automóviles en un futuro previsible. Los motores de turbina sólo materializan ganancias importantes de potencia y rendimiento a temperaturas muy elevadas, y los fabricantes no han encontrado todavía componentes de bajo precio capaces de soportarlas.

Presumiblemente, tales componentes serían de materiales cerámicos, sólidos duros pero quebradizos que no son ni metales ni polímeros. Los átomos que componen las cerámicas se encuentran trabados unos con otros en enlaces químicos inflexibles, capaces de soportar temperaturas elevadas y el ataque químico. Desdichadamente, el propio vigor de los enlaces hace que las cerámicas sean muy vulnerables a diminutos defectos estructurales. Para evitar la aparición de grietas, los ingenieros han de reducir al mínimo el número de defectos por medio de técnicas de procesamiento muy minuciosas.

Se han fabricado álabes cerámicos para turbina capaces de funcionar impecablemente a temperaturas de 1350 grados centígrados. En ese terreno de juego habrían de desenvolverse las turbinas de automoción para ser rentables. Lo malo es que el motor entero habría de ser cerámico.

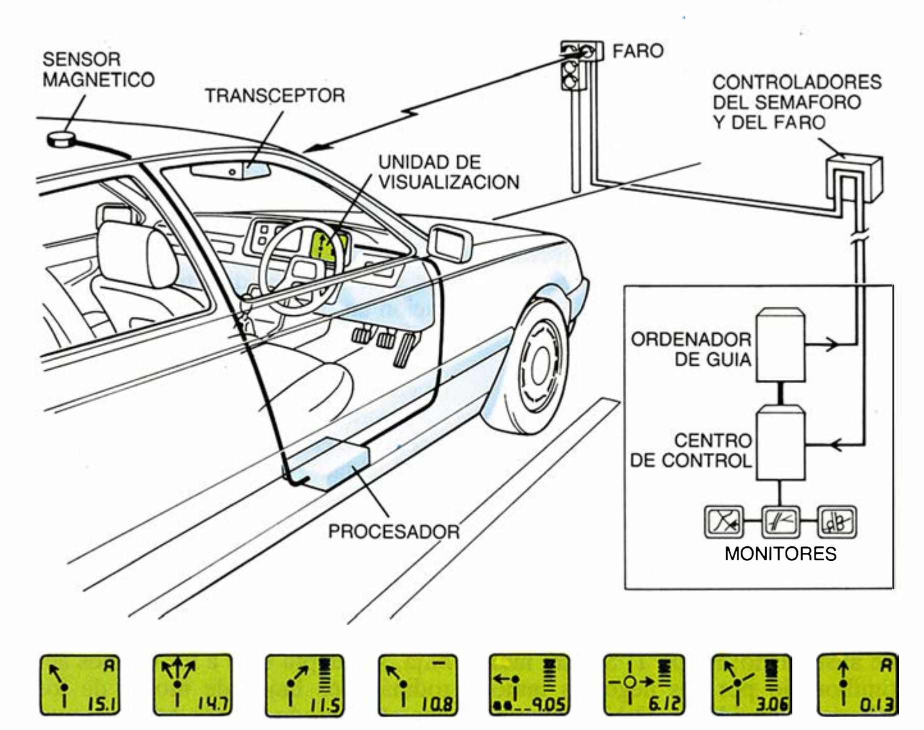
Los investigadores también han de averiguar todavía cómo lograr las piezas capaces de resistir bruscos cambios de temperatura, cómo aislar térmicamente la estructura que rodee a la turbina y cómo sellar ciertas partes del motor. "Después hay que averiguar cómo procesar tales cosas, de manera que, cuando se fabriquen en masa, funcionen todas", añade Peter Beardmore.

Los japoneses se han empeñado vigorosamente en el desarrollo de piezas cerámicas para motores de turbina de gas. Toyota y Nissan tienen participaciones en manufacturas cerámicas; otras compañías, Isuzu entre ellas, han establecido laboratorios propios de investigación en cerámicas. Pero hasta los fabricantes japoneses admiten que falta mucho para que la turbina de gas se encuentre lista para la producción de automóviles.

Por fortuna, las cerámicas y otros nuevos materiales se hallan mucho más próximos al mercado en los motores tradicionales. El titanio, el aluminio, los polímeros y los compuestos metálicos —amén de las cerámicas— están encontrando aplicación en válvulas, émbolos, bulones, bielas, grupillas y retenes, cárteres, bloques de cilindros y múltiples de admisión. Tales materiales, fuertes y ligeros, mejorarán el aprovechamiento del combustible rebajando el peso del vehículo, e incrementarán el rendimiento del motor al reducir los rozamientos.

Pero el campo más activo en materiales para automoción es tal vez el de los materiales compuestos ("composites") y, en especial, los elementos estructurales. Un automóvil en el que todos los componentes estructurales de la carrocería se hicieran con materiales compuestos de base polimérica podría ser un 30 por ciento más ligero que los modelos actuales en producción. Y los compuestos hacen el montaje más rápido y sencillo, porque piezas que normalmente es necesario remachar o soldar pueden fabricarse en un solo módulo. Las 400 piezas de acero que componen la estructura de la carrocería de un Taurus, por ejemplo, quedaron integradas en sólo cinco secciones de material compuesto en uno de los autos de nueva concepción de Ford.

Los compuestos moldeables utilizados en la industria de automoción consisten, por lo general, en resinas



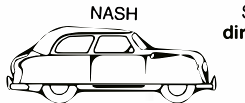
3. UN COCHE INTELIGENTE del sistema de navegación Autoguide, de Londres, permite que el conductor informe de su destino mediante un mando a distancia de bolsillo (no se muestra en la figura); el procesador del auto se comunica entonces con un centro de control mediante haces de señales infrarrojas. Un monitor integrado en el tablero informa al conductor cuántos kilómetros le quedan por viajar (cifras)*, si ha de seguir al frente o girar* (flechas)*, cuán cerca se halla de un cruce crítico* (barras) *y si se trata de un cruce ordinario o de una glorieta* (círculo en blanco)*.*

Rover, en el Reino Unido, construye la primera **turbina de gas** para automóvil

Los **neumáticos sin cámara** pasan a ser equipo de serie

Se introduce en coches de serie la **inyección de combustible**

1950 **1951** **1954** **1956** **1957**



Se dispone de **dirección asistida**

Felix Wankel (Alemania Federal) exhibe el **motor rotativo**

de poliéster, resinas epoxídicas, éster-vinílicas o de uretano, reforzadas con vidrio, grafito, mica y otros materiales que les proporcionan rigidez estructural. La introducción del Corvette, lanzado por General Motors en 1953, señaló la primera aparición de "pieles" plásticas reforzadas con fibra de vidrio en un automóvil de producción en masa; desde entonces, los materiales compuestos han ido encaramándose sobre las carrocerías de acero de los autos, en forma de aletas, guardabarros, parachoques, portones traseros y capós. Más recientemente, el Fiero de General Motors demostró que era viable la construcción de una carrocería entera mediante paneles de plástico atornillados a un armazón de acero.

Pero los fabricantes quisieran utilizar materiales compuestos también por debajo de los paneles exteriores, en las partes del vehículo que soportan casi todo el peso y que están sometidas a los mayores esfuerzos. Tales elementos estructurales exigen compuestos más fuertes, que actualmente se fabrican mediante un laborioso proceso llamado moldeado por inyección-reacción (MIR).

En el moldeado por inyección-reacción, se envuelve un inserto de espuma con una pre-forma que recuerda a una manta de fibra de vidrio blanca y se introduce después en un molde; seguidamente se rocía el molde con resina y se deja que la estructura completa cure. Hace años que Lotus viene utilizando este procedimiento. Pero el curado tarda horas; Lotus produce sólo dos coches al día. Los fabricantes desean dar con el método de incorporar el MIR a un proceso de manufactura que lance un coche cada tres minutos.

"Los materiales compuestos exigen una transición en la forma en que diseñamos, manufacturamos y montamos automóviles", explica Irvin E. Poston, director de materiales compuestos en el equipo de ingeniería avanzada de General Motors. Poston añade que la mayoría de las piezas de compuestos hoy existentes en el mercado fueron fabricadas mediante un proceso de manufactura llamado moldeado por compresión, que se basa en el mismo procedimiento que la estampación de metal, utilizado para formar piezas de acero. El moldeado por compresión es rápido; pero, como le sucede al estampado, no permite moldes grandes, que integren en sí un elevado número de piezas. Y el llamado compuesto de moldeado por láminas (SMC) necesario para el moldeado por compresión carece de resistencia suficiente para aplicaciones estructurales.

En última instancia, los compuestos plásticos podrían resultar perjudicados por uno de los atributos que más recomendables los hacen: su durabilidad. Existen indicaciones, especialmente en Europa, de que los fabricantes no obtendrán luz verde para los automóviles compuestos mientras no muestren claramente de qué manera los reciclarán. Pero los esfuerzos por aumentar el reciclaje de los compuestos podrían también debilitar su estructura.

Listillos callejeros

Hay al menos otro material que promete desempeñar un papel importante en el futuro del automóvil: el silicio. En los motores de nuestros días, son dispositivos microelectrónicos los que en mayor o menor medida se encargan de todo. Muchos de los parámetros de funcionamiento del motor —como la relación aire/combustible, la recirculación de gases de escape y su distribución entre los cilindros— están supervisados por ordenador. También intervienen en el control de la ambientación interior, de los cinturones de seguridad y en el tablero de instrumentos.

Los sistemas electrónicos suponen en la actualidad alrededor del 6 por ciento del valor de un automóvil. Los miembros del "oráculo de Delfos" opinan que hacia el año 2000 esa cifra se habrá elevado al 20 por ciento, al entrar en plena producción los frenos antibloqueo, las suspensiones activas y otras tecnologías con fundamento computacional. De todos modos, gran parte de toda esta potencia computacional quedará soterrada en nueva tecnología para autos y carreteras inteligentes, expresión que alude a un variado repertorio de artilugios electrónicos que facilitarán a los conductores y a los servicios de control de tráfico información continua e instantánea ("en tiempo real") sobre accidentes, embotellamientos, rutas óptimas y servicios de carretera, amén de sistemas anticolisión y de sistemas de seguimiento de carril en autopistas, que adviertan a los conductores de desastres inminentes o permitan que el auto se conduzca a sí mismo.

Los esfuerzos más organizados en este sentido tienen lugar en Europa, donde existen dos grupos de trabajo integrados por investigadores de industrias y universidades, organizaciones particulares y estatales, fabricantes y proveedores. El plan PROMETHEUS (encaminado a lograr un tráfico europeo de rendimiento máximo y seguridad sin precedentes) es un consorcio a ocho años, con un presupuesto cercano a los 10.000 millones de pesetas, lanzado en 1986 bajo los auspicios del programa EUREKA, programa con el que la Comunidad Económica se propone aumentar la competitividad europea. Entre los miembros de PROMETHEUS se cuentan 12 de los principales fabricantes europeos, más de 70 instituciones de investigación y más de 100 empresas subsidiarias y de electrónica.

El programa DRIVE (siglas de la expresión inglesa correspondiente a "infraestructura especial viaria para la seguridad de los vehículos en Europa"), que comenzó en enero de 1989, encamina sus esfuerzos más a la infraestructura de las carreteras que a la tecnología de los vehículos. Su presupuesto es de unos 1500 millones de pesetas para tres años; la mitad de los fondos proceden de la Comisión Europea; la otra mitad, de los gobiernos e industrias de los países copartícipes. Además de los programas DRIVE y PROMETHEUS, hay en Europa otra media docena de grupos menores, cobijados bajo el paraguas del EUREKA y dedicados a problemas específicos de los sistemas inteligentes vehículo/autovía.

Uno de los resultados más celebrados de tales programas es la red LISB (sistema de guía e información del área de Berlín, en el sector occidental). La red interconecta unos 500 automóviles que suministran información viaria de una zona que cuenta con unos 3000 kilómetros de carretera, 4500 cruces y unos 1300 semáforos. Los coches transmiten y reciben

Se crea en los EE. UU. el **Ministerio de Transportes**

1966

STUDEBAKER

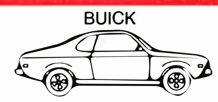
1971

Diseño de motores para **gasolina sin plomo**

Los automóviles nuevos están equipados con **convertidores catalíticos** (EE.UU.)

1974

BUICK



datos de 250 faros infrarrojos situados en los arcenes, a razón de 8 kilobytes (8000 caracteres) por segundo. La red LISB está patrocinada por el Ministerio Federal de Investigación y Tecnología, el Senado berlinés y las compañías Siemens y Bosch. Londres ha tomado prestada la tecnología LISB para establecer un programa parecido, llamado Autoguide.

En Japón, un sistema llamado AMTICS, patrocinado por la Agencia Nacional de Policía y el Ministerio de Correos y Telecomunicaciones, proporciona equipos para orientación a ciegas, por mapas, mediante teleterminales instalados en los vehículos y conectados por radio celular a un centro de control de tráfico. Las compañías que participan en AMTICS son unas 50; otras 25 participan en RACS ("sistema de comunicaciones automóvil/ carretera), que está administrado por el Instituto de Investigación en Obras Públicas.

La OTA (Oficina de Evaluación Técnica, dependiente del Congreso estadounidense) ha recomendado que el gobierno establezca un calendario nacional para la tecnología de sistemas inteligentes vehículo/autovía (SIVA), y tanto la Secretaría de Finanzas como la Academia Nacional de Ciencias están examinando la factibilidad de la investigación. Los proponentes confían en que el Congreso reserve algún dinero para ellos cuando se vuelva a autorizar este año el Fondo para el Consorcio de Autopistas.

¡Sin manos!

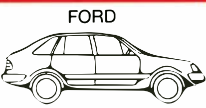
En ciertos aspectos, la industria estadounidense ha sido tan lenta en ponerse en movimiento como el gobierno. Steven E. Shladover, director técnico del plan PATH californiano, dice que estuvo durante años dando largas a los ambiciosos planes de las industrias europeas y japonesas, hasta que las estadounidenses mostrasen algo de interés por los 26 proyectos de su programa, el mayor del país.

Shladover opina que la mejor solución para las desdichas de California es el sistema de "pelotones", consistente en apiñar los coches mucho más cercanos unos a otros en las autopistas, dotándolos de sistemas para evitar las colisiones, de seguimiento de carriles y otros sistemas de control automático. Tales sistemas funcionan de ordinario por medición de los ecos de señales de sonar o radar procedentes de los automóviles vecinos y utilizan visión mecánica para localizar los trazos de los carriles. El sistema automático de conducción se encarga de dirigir, acelerar o frenar el vehículo cuando ello es necesario.

Las actuales autopistas pueden soportar alrededor de 2000 vehículos-hora por carril, dice Shladover; por encima de esa cifra, el tráfico se convierte en "turbulento" para los cien-

4. UNA CADENA DE MONTAJE de tiempos de la Depresión, captada en este detalle del mural Detroit Industry *(1932-33) ñudo de los obreros fue entendido como una denuncia contra la producción en masa. La automatización de las fábricas ha cambia las personas siguen haciendo mejor que las máquinas ciertas tareas.*

PEUGEOT



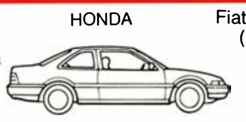
FORD

Primeros parques de vehículos **propulsados por metanol**

1983

1984

Mercedes-Benz (Alemania Federal) presenta los **frenos antiblocantes**



Nissan (Japón) ofrece **sistemas electrónicos de navegación** como equipo de serie

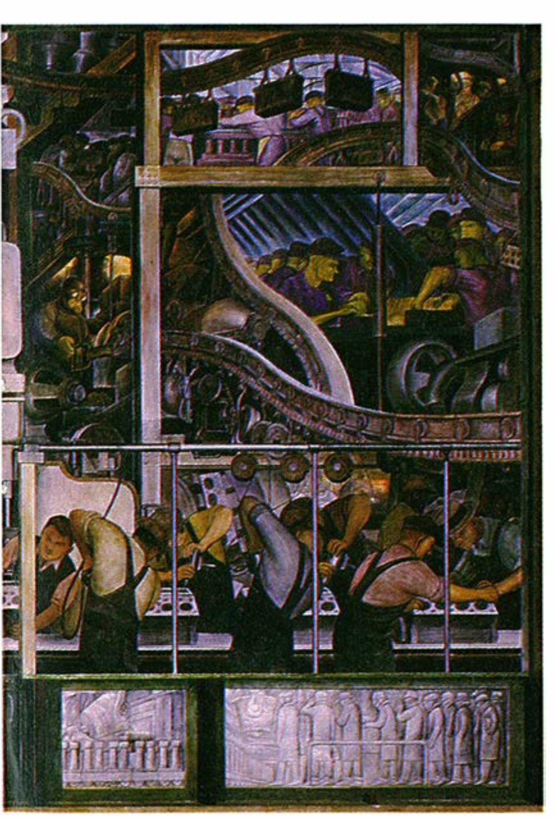
1989

1990

Fiat (Italia) y Peugeot (Francia) lanzan al mercado **coches eléctricos de pasajeros**

tíficos; para el automovilista, en marcha en caravana, en un puro arranca y para. Si los vehículos están viajando a 100 kilómetros por hora, la densidad media en cada carril es de un coche cada 40 metros. Si el vehículo mide 4,5 metros, se están desperdiciando 35,5 metros de autopista. Si los huecos se rellenaran con formaciones en pelotón, se podrían empaquetar hasta 7200 vehículos por carril y hora, o sea, uno cada medio segundo.

Estos mismos cálculos son aplicables en sentido lateral. Para tener en cuenta los despistes del conductor individual, los carriles de las autovías son de un 50 a un 100 por ciento más anchas de lo necesario. Proveyéndolo de apelotonamiento lateral, el puente de la Bahía de San Francisco, que tiene dos tablas de cinco carriles cada una, podría acomodar siete carriles y permitir un incremento del 40 por ciento en el flujo de tráfico.



del pintor mexicano Diego M. Rivera. El gesto cedo el trabajo en las cadenas de montaje, pero

Shladover admite que incluso mejoras de tanta importancia no serían más que ir ganando tiempo. Y todas las tecnologías SIVA han de pasar por la aceptación de los usuarios, amén de ser rentables. Los problemas de responsabilidad civil también podrían alcanzar proporciones titánicas, dice Kan Chen, ingeniero eléctrico de la Universidad de Michigan, que acuñó el término "sistemas inteligentes vehículo-autovía". En el caso de la circulación en pelotones, "si algo fuera mal podríamos tener 200 vehículos implicados en una colisión", y uno podría demandar a no menos de tres partes: a las otras personas implicadas en la colisión, a los fabricantes del coche o del sistema electrónico y al departamento de carreteras.

Womack, del MIT, opina que la gente exigirá de los sistemas de conducción automática garantías muy superiores de las que esperan de los otros conductores. "Lo que se presume es que resulta perfectamente aceptable que cada año mueran 50.000 personas (algo más de 6800 en España durante el año 1989, más unos 180.000 heridos) por coches conducidos por seres humanos, pero el número de personas que se admite puedan resultar muertas por coches conducidos por ordenadores es prácticamente nula", dice.

El aspecto de los vehículos

Nuevos combustibles, nuevos motores, nuevos materiales, nueva electrónica... Son tantas las posibilidades existentes que cuesta trabajo imaginarlas todas atiborradas en un solo vehículo. ¿Qué aspecto tendrá el coche del futuro?

El coche del futuro, dicen a la par directores e ingenieros, no consistirá en un único modelo unánimemente producido dentro de unos años en las plantas de montaje de todo el mundo; no será el remedio tecnológico definitivo de todos los males consiguiente a un siglo de automovilismo exuberante. El coche del futuro será muchos coches, y si se descarta una intervención gubernamental extrema, serán precisamente lo que solicite el cliente.

"Uno trata de satisfacer las demandas del mercado compitiendo con una serie de limitaciones impuestas por exigencias sociales", prosigue Frosch, de la compañía General Motors. "Pero lo que no se puede hacer es colocar las exigencias sociales por delante de la venta real y verdadera de vehículos a los clientes."

La globalización de la industria automovilística y de las dificultades que ha de afrontar ha traído consigo una inequívoca convergencia en la mentalidad de la industria, que se extiende a todas las facetas del negocio, desde el diseño de carrocerías hasta las técnicas de fabricación. Pero la experiencia ha demostrado que los clientes no están dispuestos a tolerar en los nuevos modelos de automóviles la homogeneidad sin paliativos. La súbita popularidad de las furgonetas en las familias que poseen dos vehículos subraya el hecho de que el encanto de un vehículo no puede ser reducido a sus elementos prácticos.

"Hasta donde la vista nos alcanza, será el cliente quien ocupe el puesto del conductor en esta industria", señala Cole, del UMTRI. La necesidad de soluciones originales ante la normativa gubernamental podría también dar pie a una diversidad de tecnologías automovilísticas que no se habían visto desde los primeros días del automóvil.

Así, pues, una de las aspiraciones de la industria en el siglo venidero es la de conseguir en los procesos de manufactura una versatilidad con la que Henry Ford jamás hubiera soñado. El nuevo paradigma de producción "parca" aflojará la presa de las economías de escala. Con el auxilio del diseño asistido por ordenador y la aplicación selectiva de automatización, los fabricantes deberían ser capaces de poner rápidamente al día sus modelos, atender a los "nichos" del mercado y responder con mayor presteza a los vaivenes en el gusto de los consumidores.

"Habrá también muchos que salgan perdiendo en esta restructuración", advierte Cole en un resumen de las últimas previsiones "Delfos". Cole pronostica tiempos difíciles para las organizaciones "rígidas" y "poco dispuestas a arriesgarse", así como una importante pérdida de empleo en la industria automovilística de todo el mundo.

La freza del capelán

Este pez deposita sus huevos en las playas de Terranova, donde los alevines permanecen una semana. Abandonan, después, la tierra y se dirigen al mar en respuesta a señales complejas transmitidas por el viento y el agua

William C. Leggett y Kenneth T. Frank

En junio, cardúmenes inmensos de pececillos plateados, los capelanes, penetran en los cientos de bahías que recortan la costa oriental de Terranova para efectuar una ceremonia fascinante. Machos y hembras se acercan por separado a las playas de grava y son arrojados sobre la costa en olas tan densamente cargadas que parecen murallas de peces. Allí, sobre el cascajo, las hembras ponen sus huevos y los machos los fecundan; después, la mayoría de peces mueren. Los huevos se adhieren a los ripios y son enterrados por las olas a profundidades de hasta 20 centímetros; forman una masa tan compacta en la grava que, si se anda por encima de ésta, se produce la sensación de caminar sobre un colchón de espuma. Larvas diminutas hacen eclosión de dos a cuatro semanas más tarde y permanecen luego en la grava un tiempo que varía desde horas a días antes de abandonar, de forma rauda y simultánea, sus guarderías cercadas de tierra para dirigirse hacia el mar.

No hay ningún otro frezador terrestre cuyas larvas penetren en el mar a intervalos tan impredecibles. ¿Qué gobierna la sincronización de la emergencia? ¿Qué ventaja adaptativa proporciona dicha sincronización? Estas preguntas tienen un interés a la vez intrínseco y económico, puesto que el capelán representa una pesquería de importancia comercial y proporciona una gran parte de la dieta de muchos peces, aves y mamíferos del Atlántico Norte.

El capelán (*Mallotus villosus*), un primo marino del eperlano de agua dulce, alcanza una longitud de 20 centímetros y un peso de 20 gramos en su tercer o cuarto año, cuando llega a la madurez sexual y se halla en sazón para la red del pescador. Unicamente se comercializan las hembras cargadas de huevos (selección facilitada por la tendencia del pez a formar cardúmenes por edad y sexo), porque sólo ellas son apreciadas como alimento. La mayor parte de la captura canadiense se vende ahora al Japón, donde los bares sushi sirven el shishamo, un manjar frito exquisito y ligero.

La distribución circumpolar del capelán sustenta pesquerías comerciales cerca de Hokkaido, en Islandia, en el mar de Barents y en aguas de Terranova y del Labrador, donde su llegada se celebra ceremoniosamente en muchos pueblos pescadores. Los lugareños dan la bienvenida al capelán en parte como heraldo del bacalao, mucho más importante y que sigue al capelán en sus migraciones y lo depreda.

Igual que otros muchos peces marinos, los capelanes sufren espectaculares variaciones en su número. Entre 1975 y 1979, por ejemplo, la biomasa del capelán en la población de Terranova oriental se redujo desde cerca de cuatro millones de toneladas métricas a menos de medio millón, un ciclo de auge y quiebra que tuvo un gran efecto en la economía de Terranova y en las poblaciones de otras especies de la red alimentaria del Atlántico noroccidental. Los investigadores ha intentado responder desde hace mucho tiempo a la pregunta de qué es lo que regula estos cambios, frecuentes y sorprendentes, en la abundancia de los peces marinos. Nuestro interés por el problema, unido a la reducción del capelán durante un período de rápida expansión en la pesquería comercial, nos llevó en la primavera de 1978 a iniciar una serie de estudios de los factores que regulan la abundancia del capelán. La investigación se llevó a cabo con subvenciones del Consejo de Investigación en Ciencias Naturales e Ingeniería y del Departamento de Pesquerías y Océanos. Comenzamos en Bryants Cove, un lugar de freza situado a unas 60 millas al noroeste de Saint John, la capital de Terranova.

Aunque se conocía bien el ciclo biológico general del capelán, no se dominaban sus primeros estadios de desarrollo. Por ello nos concentramos en las fases que van de la freza a la metamorfosis de las larvas en la forma juvenil, que se caracteriza por la reorganización del sistema digestivo y la pigmentación del cuerpo, antes transparente. Este período temprano, que dura unos 10 meses, supone hasta el 99 por ciento de la mortalidad de todas las especies de peces que han sido objeto de estimaciones.

Empezamos muestreando sistemáticamente la playa de Bryants Cove con un sacatestigos similar a los utilizados para extraer muestras de suelo. Más del 60 por ciento de los huevos se encontraron cerca del límite superior de la playa, donde se hallan sumergidos sólo durante una o dos horas al día, en marea alta. El resto de los huevos, distribuidos por los niveles intermedio y de marea baja de la playa, quedan sumergidos durante

WILLIAM C. LEGGETT y KENNETH T. FRANK han colaborado estrechamente en el estudio de la ecología marina. Leggett, decano de ciencias, enseña ecología en la Universidad McGill de Montréal. Se licenció en filología e historia por el Colegio Universitario de Waterloo en 1962 y después se pasó a la ecología, graduándose en la Universidad de Waterloo en 1965 y doctorándose por la de McGill en 1969; se incorporó al claustro de McGill al año siguiente. Este es su segundo artículo para *Investigación y Ciencia*. Frank trabaja en la división de peces marinos del departamento de pesquerías y océanos del Instituto Bedford de Oceanografía de Dartmouth, Nueva Escocia. Se doctoró en biología por la Universidad de Toledo en 1978 y realizó su investigación postdoctoral en McGill antes de incorporarse al instituto en 1983.

1. PLAYA DE GRAVA que cobija los huevos puestos y fertilizados por los capelanes maduros, la mayoría de los cuales mueren de agotamiento poco después de la freza. Los peces larvarios eclosionan al cabo de pocas semanas y después permanecen en la grava durante horas o días, hasta que todos ellos emergen, se dirigen, al unísono, hacia el mar y empiezan a alimentarse.

períodos que van de dos a 24 horas al día. La mayoría de los huevos de capelán se incuban, pues, en un ambiente semiterrestre cuyo régimen térmico está dominado por las condiciones meteorológicas, como la temperatura del aire y la intensidad y duración de la insolación directa. La variación térmica se amplía con la inundación mareal de los huevos, dos veces al día, por las aguas del Atlántico Norte a temperaturas que van de los cero a los ocho grados Celsius.

Observamos que el 85 por ciento de la variabilidad en los tiempos medios de eclosión podía atribuirse a oscilaciones en las temperaturas medias de incubación diaria. Esta relación se mantenía de uno a otro año y de un lugar a otro en diferentes cohortes de huevos. (El período de freza de una semana de duración produce de dos a tres de tales cohortes.) Pudimos verificar nuestros resultados comparándolos con registros de la freza del capelán desde los últimos años de la década de 1920, lo que mostró que las fechas de freza venían a coincidir sincrónicamente a lo largo de la costa, si bien variaban del orden de hasta tres semanas de un año al siguiente.

Las condiciones meteorológicas y oceánicas no sólo afectaban a la tasa de eclosión de los huevos, sino también a sus probabilidades de supervivencia. La densidad de los huevos condicionaba la tasa de supervivencia: cuanto mayor era la densidad, menor resultaba la tasa (posiblemente debido a la depleción de oxígeno). Estas variables pueden analizarse para efectuar previsiones muy fiables del éxito de la eclosión.

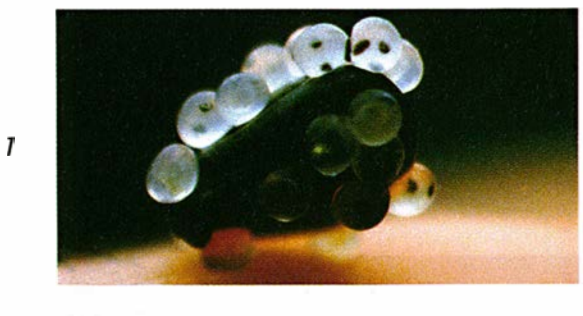
Había un aspecto curioso del proceso de eclosión que nos intrigaba: el número de larvas en la grava de la playa aumentaba repetidamente desde casi cero hasta más de un millón por metro cúbico a lo largo de aproximadamente una semana, y luego, de golpe, se reducía de nuevo hasta quedar a cero. Muestreamos las aguas inmediatas a la playa en busca de capelanes larvarios y encontramos una pauta temporal de abundancia que era inversa a las densidades larvarias en los sedimentos. Cuando las playas estaban acumulando larvas, no había ni 10 larvas nadando libremente en cada metro cúbico de agua; con las playas vacías de larvas, la población de nadadores subía a más de 4000 por metro cúbico. Era evidente que se iban acumulando en el cascajo de la playa hasta que algo les inducía a lanzarse simultáneamente al agua, proceso que se repetía hasta que todas habían hecho eclosión y se habían ido.

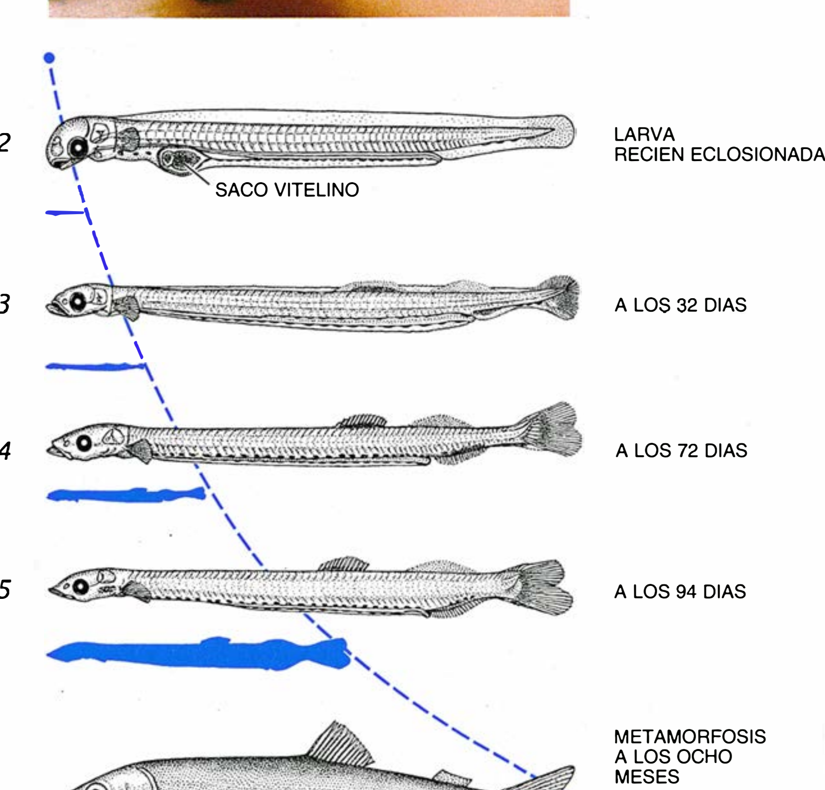


Esta pauta contingente de emergencia no se repite en ningún otro pez marino que frece en playa. El gruñón de California, por ejemplo, freza en la playa durante las mareas más altas (vivas) del ciclo lunar, y los huevos eclosionan durante la inundación en la marea viva siguiente, dos semanas después; la emergencia larvaria se produce de inmediato. Sin embargo, observamos que las larvas de capelán se mostraban indiferentes a los ciclos de marea o de luz y al simple paso del tiempo. En realidad, reaccionaban ante una sola variable meteorológica: los cambios en la dirección del viento.

Los vientos dominantes en el verano de Terranova oriental son terrales, o del sudoeste. Los vientos de marea son fugaces y escasos; se cuentan, en promedio, uno cada cinco a seis días, aunque la frecuencia es muy variable. En 1954 Wilfred Templeman, entonces en el Departamento de Pesquerías y Océanos del Canadá, en Saint John, sugirió que los vientos terrales dominantes arrastraban el agua superficial cálida mar adentro, agua que era sustituida por masa fría que afloraba de las profundidades. En cambio, los vientos de marea impelían hacia tierra el agua superficial cálida, donde ésta se hundía y desplazaba las aguas subsuperficiales frías, caldeando la región litoral. Christopher T. Taggart, alumno de doctorado que trabajaba en nuestro laboratorio, pudo confirmar la hipótesis de Templeman en una serie de estudios de oceanografía física realizados en Bryants Cove. Su investigación demostró que las liberaciones en masa sincrónicas de larvas de capelán coincidían con la llegada de aguas superficiales cálidas, arrastradas hacia el litoral y hasta la parte superior de la playa por los vientos de marea.

El paso siguiente consistió en determinar la causa inmediata de su emergencia. El viento de marea perturbaba los sedimentos de la playa de modo significativo; cabía, era una posibilidad, que las larvas fueran simplemente desplazadas por las olas. Sometimos a prueba esta posibilidad en acuarios que reproducían todos los fenómenos que se daban en la playa, excepto la agitación del oleaje. Los resultados demostraron que la agitación producida por las olas no era un factor determinante: la aparición se daba durante los períodos de aumento de la temperatura del agua, exac-



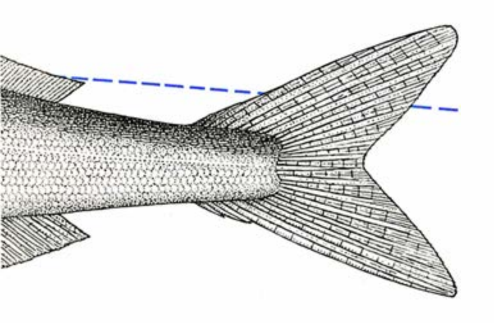


2. CICLO REPRODUCTOR del capelán; se inicia cuando un huevo fertilizado se pega a la grava (*1*). Una larva transparente de unos cuatro milímetros de longitud (*2*) sale del huevo al cabo de unas pocas semanas y se nutre de su vitelo, almacenado en un saco situado detrás de la cabeza, en espera de que los vientos aporten aguas cálidas ricas en alimento adecuado hasta la zona nerítica (inmediata al litoral); entonces, la larva abandona la playa y se dirige al mar (*3*). Allí crece otros 60 milímetros (*4, 5*) antes de metamorfosearse en un juvenil pigmentado con un sistema digestivo más complejo, capacitado para procesar presas mayores (*6*). El pez alcanza la madurez sexual dos o tres años después (*7*). Siluetas y línea (*color*) indican el tamaño real.

tamente igual que ocurría en la playa. Este descubrimiento era importante ya que sugería que la residencia prolongada de las larvas en la playa constituía también una respuesta activa al aumento de la temperatura del agua, resultado a su vez del movimiento hacia la costa del agua superficial impulsada por el viento.

¿Qué ventaja adaptativa proporciona esta emergencia en aguas superficiales cálidas? Para contestar a la pregunta, examinamos las características biológicas de las dos masas: la cálida y la fría. Encontramos que en el agua cálida predominaban diminutos organismos del zooplancton (que se alimentan de diatomeas y de otras plantas microscópicas) y copépodos inmaduros (organismos mayores del zooplancton); es decir, partículas cuyo diámetro oscila entre las 30 y las 100 micras. Este alimento es ideal para larvas que se abastecen por primera vez, cuyas mandíbulas no pueden contener presas mayores. En cambio, en el agua fría predominaban animales zooplanctónicos de mayor tamaño; también albergaba muchas más medusas e invertebrados afines que se alimentan de larvas de peces. Planteamos, como hipótesis, la siguiente: el agua superficial cálida proporcionaba a las larvas de capelán alimento y asilo, constituyendo así lo que llamamos un lugar seguro.

Deseábamos evaluar la importancia de los lugares seguros en experimentos que comprobaran por separado el interés del tamaño de la presa y el papel de los depredadores en distintas masas de agua. Por lo general estos experimentos se han realizado en pequeños contenedores de laboratorio cuya capacidad no sobrepasa los 10 litros; nosotros dudábamos de que tales ambientes reprodujeran bien las condiciones naturales: tienden a situar a los depredadores demasiado cerca de sus presas. Por ello dispusimos un recinto grande, capaz de mantenerse en el mar para experimentar *in situ*. Cada uno de tales "mesocosmos" (cuyo diseño debe mucho a Yves deLafontaine, alumno de doctorado de nuestro laboratorio) encierra unos 4000 litros de agua en un cilindro de dacrón de un metro de diámetro por cinco de profundidad. Se suspendieron varios mesocosmos de una plataforma flotante para reproducir las variaciones naturales de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto a todas las profundidades. La baja porosidad del dacrón nos permitía manipular el tamaño y la concentración del zooplancton, así como la abundancia de larvas de capelán.



Estudiamos de qué modo las variaciones en el zooplancton inducidas por el viento afectaban a las larvas que empezaban a comer, alojando en cada mesocosmos un millar de capelanes recién eclosionados y luego añadiendo, de forma alternativa, zooplancton típico de agua superficial cálida y de agua fría profunda. La velocidad de crecimiento de las larvas que comían presas de aguas cálidas duplicó el ritmo de las que comían presas de agua fría, en tanto que la tasa de mortalidad de las primeras cayó a un tercio de las últimas. Era evidente que la aparición de las larvas ocurría en el momento en que se producían las mejores condiciones alimentarias.

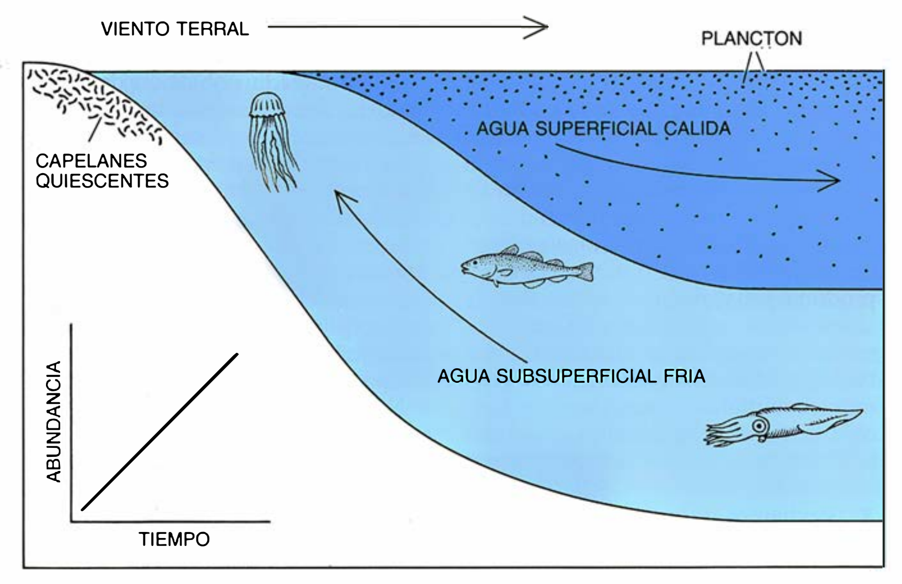
Pero comer no es suficiente; los animales deben también evitar ser comidos. ¿Evitaban las larvas de capelán acaso la depredación total mediante una aparición en masa que saciara a los depredadores, y permitir así la supervivencia de un remanente? (Esta es la estrategia de las cigarras que emergen sincrónicamente cada 17 años, con lo que desconciertan a sus enemigos aviares mediante la abundancia.) DeLafontaine demostró que los capelanes no saciaban a las medusas, uno de sus principales depredadores. Comprobó, primero, que las medusas consumían hasta el 25 por ciento de las larvas de un mesocosmos en un día, y, luego, que no paraban de comer (síntoma de saciedad) ni siquiera en presencia de concentraciones muy elevadas de larvas.

Llegamos a la conclusión de que las larvas de capelán escogían el momento de su emergencia, en parte, para evitar a las medusas y a otros depredadores típicamente asociados a la masa de agua fría. Esta explicación puede tener un significado más amplio, porque parece limitar la aplicación de un modelo ampliamente citado de oscilación entre depredador y presa. (Un ejemplo común es el caso de los linces y de las liebres árticas del Canadá: los linces se comen a las liebres hasta que no quedan suficientes para sostener la población de depredadores; entonces, los linces mueren en masa, lo que permite que las liebres se multipliquen con libertad y desencadenen así un resurgimiento en la población de linces.) Los capelanes eran numerosos cuando sus depredadores eran escasos, fenómeno no debido a este tipo de relación dinámica, sino explicable porque los capelanes emergían en sitios seguros donde había pocos depredadores.

Nuestra teoría encuentra su confirmación en estudios de la abundancia de las larvas de tres especies que frezan en el fondo de los bajíos en la costa de Terranova: la platija de invierno, la babosa radiada y los limacos de mar. Los resultados obtenidos nos llevaron a hacer una revisión detallada de algunos de los muchos estudios sobre oscilaciones recíprocas de depredadores con presas: larvas de atún, platija de invierno, boquerón, gobios, arenque y solla. Encontramos pruebas considerables de que las pautas que reflejaban estos estudios resultaban, asimismo, de la ocupación selectiva de lugares seguros. Es evidente que los investigadores deben proceder con mayor cautela a la hora de aplicar el modelo clásico de oscilación de población a las larvas y a sus depredadores.

Desde luego, nuestros propios resultados procedentes de Bryants Cove tenían también que tomarse con prudencia hasta que pudieran corroborarse mediante estudios de áreas mucho mayores. Inspeccionamos cinco playas más en las que el capelán freza, distribuidas a lo largo de los cientos de kilómetros de la costa oriental de Terranova. En cada lugar medimos la variación temporal en la temperatura del agua y en la abundancia de las larvas de capelán que emergían, así como en la de sus depredadores y presas. Encontramos que los cambios principales en las temperaturas del agua costera y en el número de larvas de capelanes, de sus presas y de sus depredadores guardaban relación con la pauta de los vientos, más o menos sincrónicos en todas las localidades. Inferíase que nuestros resultados en Bryants Cove eran una representación fidedigna de lo que ocurría a lo largo de la mayor parte de la costa de Terranova.

En 1982 Taggart confirmó los resultados de nuestros estudios en mesocosmos mediante datos obtenidos del mar abierto. Estimó las tasas de mortalidad para distintas cohortes larvarias, es decir, clases de larvas que emergían en respuesta a aconte-



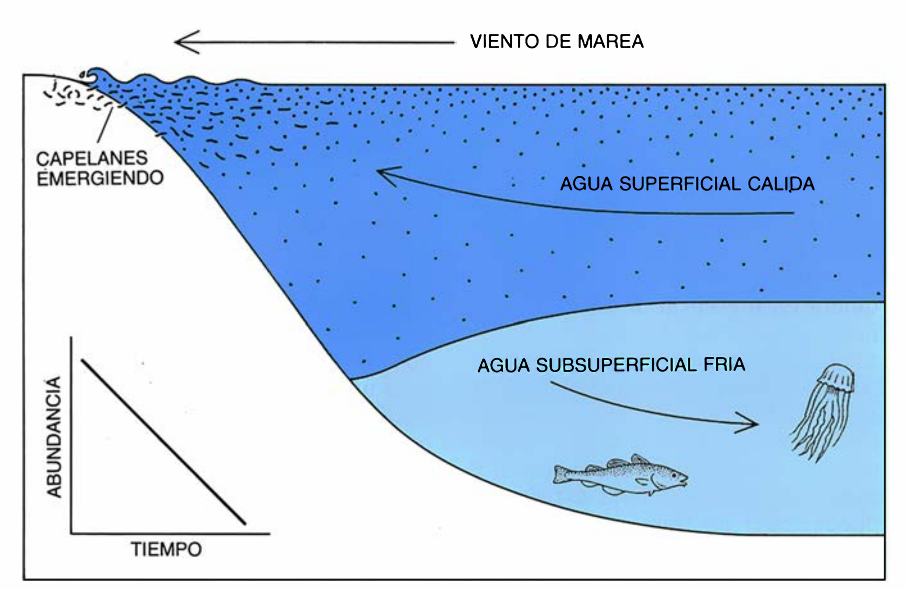
3. RECIEN ECLOSIONADAS, las larvas se acumulan en tierra mientras prevalgan los vientos terrales. Los vientos arrastran hacia alta mar el agua superficial; aflora agua más fría, rica en depredadores y pobre en presas, convirtiendo la región nerítica en inhóspita para las larvas.

cimientos discretos de vientos de marea. Pudo sacar partido de las peculiaridades del capelán y de Bryants Cove para evitar dos fuentes comunes de error en la estima de las tasas de mortalidad de los peces: las tendencias a confundir una cohorte con otra y a contabilizar como muertas las larvas que simplemente se han dispersado fuera de la zona de inspección. El problema de las cohortes se resolvió: las larvas de capelán emergían sincrónicamente dentro de intervalos discretos, o "ventanas". La distorsión producida por la dispersión larvaria se solucionaba midiendo y modelando el flujo de agua que salía del área inspeccionada.

Taggart encontró que varias cohortes de larvas que emergieron en 1982 y 1983 sufrieron tasas de mortalidad que iban del 3 al 100 por ciento y que, en promedio, eran del 60 por ciento. Esta pauta no guardaba relación con la abundancia de zooplancton comestible, hallazgo que contradecía el modelo dominante para la supervivencia de las larvas de peces. El modelo, formulado por el noruego Johan Hjort, experto biólogo pesquero, a principios de la década de 1900, relaciona las variaciones anuales en la supervivencia larvaria con cambios en la abundancia del alimento del tamaño adecuado. Para el capelán (y quizá para otras especies) parece que las respuestas de comportamiento a las señales oceanográficas pueden eliminar en gran parte los efectos que el tamaño y la abundancia del alimento tienen sobre la mortalidad.

También existía una débil relación a largo plazo entre la mortalidad larvaria y el número de sus depredadores (las medusas y los quetognatos, invertebrados vermiformes y con aletas). Este descubrimiento era lo que podía esperarse de la estrategia de emergencia selectiva del capelán. Sin embargo, cabe señalar que la mortalidad del capelán en un día determinado estaba fuertemente correlacionada con la abundancia de depredadores, que variaba con el tiempo incluso en la masa de agua cálida. Esto apoyaba la idea de que la depredación podía convertirse en importante regulador de la supervivencia larvaria en aquellos casos en los que larvas y depredadores coexisten.

Los hallazgos de Taggart también corroboraron nuestra teoría de que la estrategia de emergencia del capelán le ayuda a encontrar alimento y a evitar a los depredadores. Pero es importante no pasar por alto los costes de tal estrategia: las larvas deben vivir a costa de las reservas de vitelo que retienen después de hacer eclosión, mientras esperan que las condiciones mejoren. Van consumiendo paulatinamente el vitelo hasta que se agota, unos 5,5 días después de la eclosión. Pasado este tiempo, las larvas que no pueden dedicarse con éxito a la búsqueda de alimento deben obtener la energía necesaria a partir de sus propios tejidos corporales, iniciando así un proceso de deterioro físico que se hace visible a los dos días y deviene fatal a los cuatro.



4. LAS LARVAS que empiezan a comer abandonan su plaza fuerte de grava en gran número cuando los vientos de marea arrastran aguas superficiales cálidas hacia la playa, lo que señala la abundancia relativa de alimento adecuado y la escasez relativa de depredadores, medusas por ejemplo.

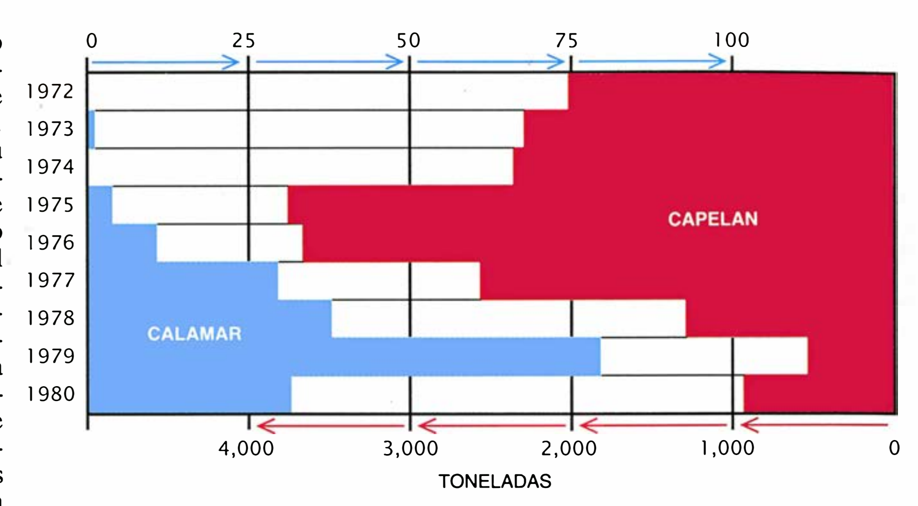
Los costes inherentes a la emergencia retardada nos llevaron a concluir que la duración de la residencia en la playa puede determinar por sí sola la supervivencia larvaria temprana. Si un viento favorable tarda demasiado en soplar, las larvas mueren o penetran en el agua en unas condiciones de debilidad que les impide encontrar alimento o esquivar a los enemigos. Taggart observó este fenómeno en una asociación entre las tasas de mortalidad y la frecuencia de los vientos de marea. En 1982 hubo más vientos de marea que en 1983, y la mortalidad larvaria global fue un 20 por ciento inferior. Las variaciones semanales en la frecuencia de los vientos de marea estaban, asimismo, correlacionadas con las diferencias en las tasas de supervivencia en 1982.

Seguimos investigando la importancia de los vientos para la supervivencia del capelán. Sumamos fuerzas

con James E. Carscadden, del Centro de Pesquerías del Atlántico Noroccidental, adscrito al departamento de Pesquerías y Océanos del Canadá. Carscadden había detectado, por su cuenta, una relación entre el éxito reproductor del capelán procedente de la freza de un determinado año (o "clase anual") y la temperatura del agua durante el período larvario. Revisamos sus registros de la abundancia estimada de clases anuales específicas en la población de Terranova oriental para averiguar si la distribución de vientos durante el período de eclosión había contribuido al éxito reproductor del capelán. Empezamos comparando el éxito reproductor con la frecuencia de vientos de marea durante el intervalo de 10 días en el que la mayoría de larvas eclosionaban y se acumulaban en las playas de ripios. Registradas las fechas de eclosión, las horas diarias de luz solar y las temperaturas medias del aire y del agua, predijimos la sincronización de la ventana de eclosión. Calculamos luego el intervalo entre vientos de marea dentro de esta ventana en cada año y lo relacionamos con la abundancia correspondiente de capelanes adultos dos años más tarde.

Este modelo sencillo, basado en el viento, explica aproximadamente el 40 por ciento de la variabilidad de un año al siguiente en la concentración de los capelanes de dos años de edad en aguas de la costa oriental de Terranova. Interesa saber que la media de 5,5 días que dura la absorción del saco vitelino en el capelán se corresponde bastante bien con el intervalo medio de 6,3 días entre un viento de marea y el siguiente a lo largo de los últimos 20 años. Esta correlación sugiere que la cantidad de energía almacenada en forma de vitelo podría representar una adaptación a las condiciones medias que las larvas experimentan durante su residencia en la playa.

Carscadden concluía que las condiciones ambientales debían influir asimismo sobre la supervivencia de las larvas después de que éstas emergieran al agua. Sometimos esa afirmación a prueba siguiendo la pista de una variable, la temperatura media del agua superficial, desde el período de emergencia hasta el mes de diciembre del primer año de vida, confiados en que sería un factor importante para una serie de procesos biológicos básicos, como la disponibilidad de alimento adecuado. La adición de esta variable produce un modelo combinado de temperatura y viento que explica más del 70 por ciento de la variación interanual en la abundancia de los capelanes de dos años de edad.



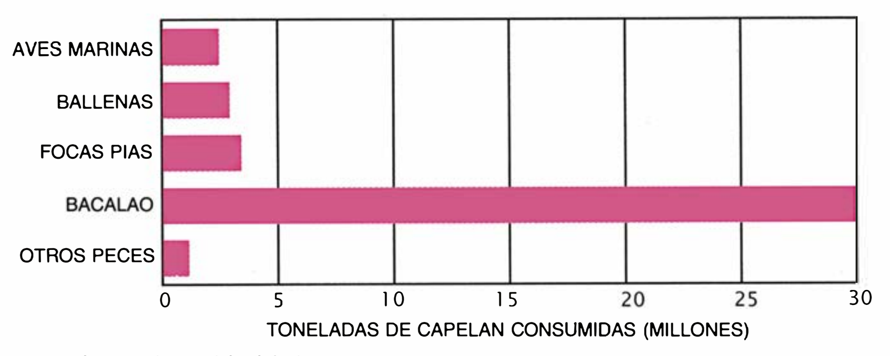
5. CLARA COMPETENCIA POR EL ALIMENTO: la abundancia de capelán y la captura de calamar en aguas costeras están inversamente correlacionadas. Una disminución cíclica del capelán deja libres millones de toneladas de plancton, su presa habitual, que serán consumidas por los calamares, cuyo número, consecuentemente, aumentará. (Ilustración recreada por Edward Bell.)

Nos preguntábamos si el gran poder predictivo de la variable térmica guardaría relación con la tasa de maduración larvaria. Se sabía que en el capelán, como en la mayoría de los demás peces marinos, la tasa de mortalidad caía sustancialmente después de la metamorfosis. ¿Podría una temperatura favorable acortar el vulnerable estadio larvario, permitiendo así que a largo plazo sobreviviera un número mucho mayor de capelanes?

Christopher R. Chambers, un becario postdoctoral de nuestro laboratorio, comprobó esta hipótesis analizando las variaciones de tamaño y edad de los peces larvarios al inicio de la metamorfosis. Demostró que la edad es cierto número de veces más variable que el tamaño y que la duración del período larvario guardaba una asociación estrecha con la tasa de crecimiento de las larvas. Su estudio indica que la varianza en la tasa de crecimiento y, por tanto, en el tiempo que se tarda en alcanzar la metamorfosis, puede inducir una variación del orden de cien veces en el número de larvas supervivientes hasta el estadio juvenil.

Como hemos mencionado, el capelán sirve de presa a aves, mamíferos y peces; también compite por el alimento con otros organismos planctófagos. Variaciones en su número como resultado de cambios meteorológicos tienen, por ello, un efecto de onda que se propaga arriba y abajo de la cadena alimentaria. Por ejemplo, cuando la biomasa de capelán se redujo espectacularmente entre 1975 y 1979, más de 300.000 toneladas métricas diarias de zooplancton se vieron libres del consumo por parte de esta especie y a disposición de otros organismos, según cálculos de J. Pascal Vesin, alumno de nuestro laboratorio. Durante el mismo período, las poblaciones de calamar y de bacalao ártico, que tienen una dieta similar a la del capelán, aumentaron apreciablemente en las aguas frente a Terranova nororiental, donde estas especies coinciden. El dato abona la idea de una fuerte competencia, entre estas tres especies, por el zooplancton de la región.

Las colonias de frailecillo, ave que alimenta a sus crías con capelanes, declinaron al unísono con la biomasa de capelán después de 1975. La situación del frailecillo alarmó al Servicio



6. IMPORTANCIA ECOLOGICA del capelán, que viene indicada por el significativo consumo anual de estos peces por aves marinas, ballenas, focas de Groenlandia, bacalao y otras especies.

Canadiense de Vida Silvestre, que se encarga de la protección del ave, y le llevó a acusar al Departamento de Pesquerías y Océanos de haber permitido la sobrepesca del capelán. Nuestros hallazgos ayudaron a suavizar el debate que se entabló, al demostrar que el capelán había reducido su número como resultado de una crisis reproductora causada por vientos y temperaturas del agua adversos.

En otra investigación, Hal Whitehead, entonces en la Universidad Conmemorativa de Terranova, y Carscadden estudiaron la relación entre la distribución de ballenas jorobadas de Terranova oriental y la concentración de capelanes inmaduros, de los que las ballenas se alimentan en gran cantidad. Descubrieron que, cuando los capelanes inmaduros abundaban mar adentro, las ballenas permanecían alejadas de la costa y raramente eran avistadas. En cambio, cuando años de pertinaz fracaso reproductor habían reducido la población de capelán en alta mar, las ballenas perseguían a los capelanes maduros hasta las aguas neríticas en el momento en que los peces migran allí para frezar. En tales años, las ballenas jorobadas suelen errar por los bajíos y causar mucho daño a los aparejos pesqueros locales. Whitehead y Carscadden adaptaron con éxito nuestro modelo de población del capelán para predecir la población ballenera en la región nerítica.

Nuestro modelo puede predecir con fiabilidad los cambios en la abundancia del capelán con tres años de antelación basándose en las pautas meteorológicas estivales, lo que constituye un raro ejemplo de predicción ecológica. El estudio sugiere, además, que las adaptaciones de comportamiento a los acontecimientos meteorológicos en el océano bien pudieran haber evolucionado en muchas otras especies que reciben señales vitales del sol, el viento y las mareas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

METEOROLOGICAL AND HYDROGRAPHIC REGULATION OF YEAR-CLASS STRENGTH IN CAPELIN (*MALLOTUS VILLOSUS*). W. C. Leggett, K. T. Frank y J. E. Carscadden en *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. vol. 41, págs. 1193-1201; agosto de 1984.

PREDICTING INSHORE WHALE ABUNDANCE: WHALES AND CAPELIN OFF THE NEWFOUNDLAND COAST. Hal Whitehead y J. E. Carscadden en *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 42, págs. 976-981; mayo de 1985.

Paracaídas de altas prestaciones

Modernas teorías de aerodinámica, nuevos materiales e informática han creado un paracaídas que frena una cápsula desde velocidades supersónicas hasta el paso de tortuga en cuestión de segundos

Carl W. Peterson

Con los motores a todo gas, un caza F-111 baja en picado sobre el desierto de Nevada. Tras descender desde una altitud de nueve kilómetros hasta 100 metros escasos del suelo, el reactor se nivela. Vuela a una velocidad ligeramente superior a la del sonido (Mach 1,2). El F-111 rasga el aire produciendo ondas de choque que levantan nubes de arena. Puedo ver la aeronave a medio kilómetro, aunque no oigo nada todavía. Acaba de soltar una cápsula de prueba, que contiene un paracaídas de diseño avanzado llamado B83, y un lío de cámaras e instrumentos, que registrarán el éxito o el fracaso del paracaídas. El estampido supersónico del reactor me sobresalta justo cuando el paracaídas B83 emerge de la cola de la cápsula.

Durante los siguientes cuatro segundos, mis colegas y yo sabremos si un paracaídas que se mueve más rápido que una bala de fusil puede soportar el esfuerzo de frenar una cápsula que pesa más que un coche. Si todo sale según lo planeado, el paracaídas B83 frenará desde Mach 1,2 (unos 1500 kilómetros por hora) hasta 70 kilómetros por hora en una caída de sólo 50 metros. Para lograrlo, hemos diseñado el B83 de forma que proporcione una fuerza máxima de frenado de más de 14.000 newton. (Una fuerza de esta magnitud detendría, en un metro, un coche que viajara a 100 kilómetros por hora.)

El B83 logra algo con lo que no habríamos soñado 20 años atrás, cuando los principios aerodinámicos de los paracaídas de frenado rápido sólo se conocían parcialmente y no se disponía de materiales capaces de ofrecer tales prestaciones. Incluso hoy, con materiales avanzados y refinados modelos de ordenador, el diseño de paracaídas supersónicos constituye uno de los retos más difíciles que se le presentan a la aerodinámica.

El proyecto para construir el B83 nos mantuvo ocupados en los Laboratorios Nacionales Sandia, en Albuquerque (Nuevo México), durante tres años. Buscábamos la manera de minimizar el peso del paracaídas maximizando a la vez su capacidad de frenado. Para predecir el comportamiento del paracaídas durante el inflado, acometimos una serie de simulaciones por ordenador y construimos réplicas a pequeña escala del B83 para su ensayo en túneles de viento.

Con todo, sabemos que ninguna simulación o experimento puede reproducir la dinámica del paracaídas durante las rápidas etapas de inflado en vuelo. Por ello permanecemos atentos a la prueba del B83 en el desierto. ¿Se enredará el paracaídas con las turbulencias del aire? ¿Se inflará antes de tiempo y se hará jirones? ¿Se desinflará a mitad del vuelo, dejando que la cápsula caiga a gran velocidad?

Al recobrarme del estampido supersónico, me doy cuenta de que ya me he perdido las etapas críticas de la prueba. El paracaídas se ha inflado hasta alcanzar los 10 metros de su diámetro de vuelo y la cápsula de prueba cuelga de él balanceándose como un péndulo. Un segundo después, el paracaídas aterriza entero. Mis colaboradores y yo celebramos esta pequeña victoria. Todavía pasaremos muchos meses estudiando los datos de la prueba antes de firmar nuestra evaluación final del B83. No basta con que un paracaídas sobreviva para cumplir las prestaciones que se le exigen.

La historia del paracaidismo está jalonada por modelos que operan desde altitudes cada vez mayores, frenan cada vez más deprisa, resisten velocidades cada vez más rápidas, proporcionan unos descensos cada vez más suaves y sustentan cargas cada vez más pesadas. Los paracaídas se inventaron en China hace dos mil años. Los utilizaron luego los acróbatas de ese país para frenar su caída. En el siglo xv Leonardo da Vinci se jactaba incluso de mayores hazañas: "Si un hombre dispone de una carpa de hilo sin ningún agujero... puede saltar desde cualquier altura sin temer por su vida". No sabemos si Leonardo construyó o probó algún paracaídas. Sin embargo, en 1772, el canónigo Desforges construyó un artilugio similar a un paracaídas y se lanzó desde una torre, sufriendo leves heridas.

En los siguientes 130 años, otros entusiastas construyeron paracaídas y los utilizaron en saltos que desafiaban a la muerte. En 1802 el aeronauta francés André-Jacques Garnerin se ató a un paracaídas que a su vez sujetó a un globo. Ascendió a una altitud de 2400 metros y luego se soltó. El globó estalló y él y el paracaídas cayeron en picado, pero se las arregló para aterrizar sano y salvo. Fue quizás el salto más famoso hasta 1912, cuando el capitán Albert Berry, del ejército de los Estados Unidos, saltó por vez primera en paracaídas desde un aeroplano.

Durante la primera guerra mundial, los aeronautas llevaban paracaídas como equipo de seguridad, pero los pilotos de aviones no los consideraban prácticos. Hasta la segunda

CARL W. PETERSON, director del departamento de aerodinámica de los Laboratorios Nacionales Sandia en Albuquerque (Nuevo México), se formó en la Universidad de Princeton. En 1969, ingresó en Sandia para profundizar en el campo de la aerodinámica supersónica. Ocho años después se le pidió que evaluara los trabajos que venía realizando un grupo de expertos en sistemas de paracaídas, del Departamento de Energía de EE.UU., del Departamento de Defensa y la Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio (NASA). Encabeza otro que analiza la aerodinámica de misiles, bombas, cohetes, submarinos y aerogeneradores.

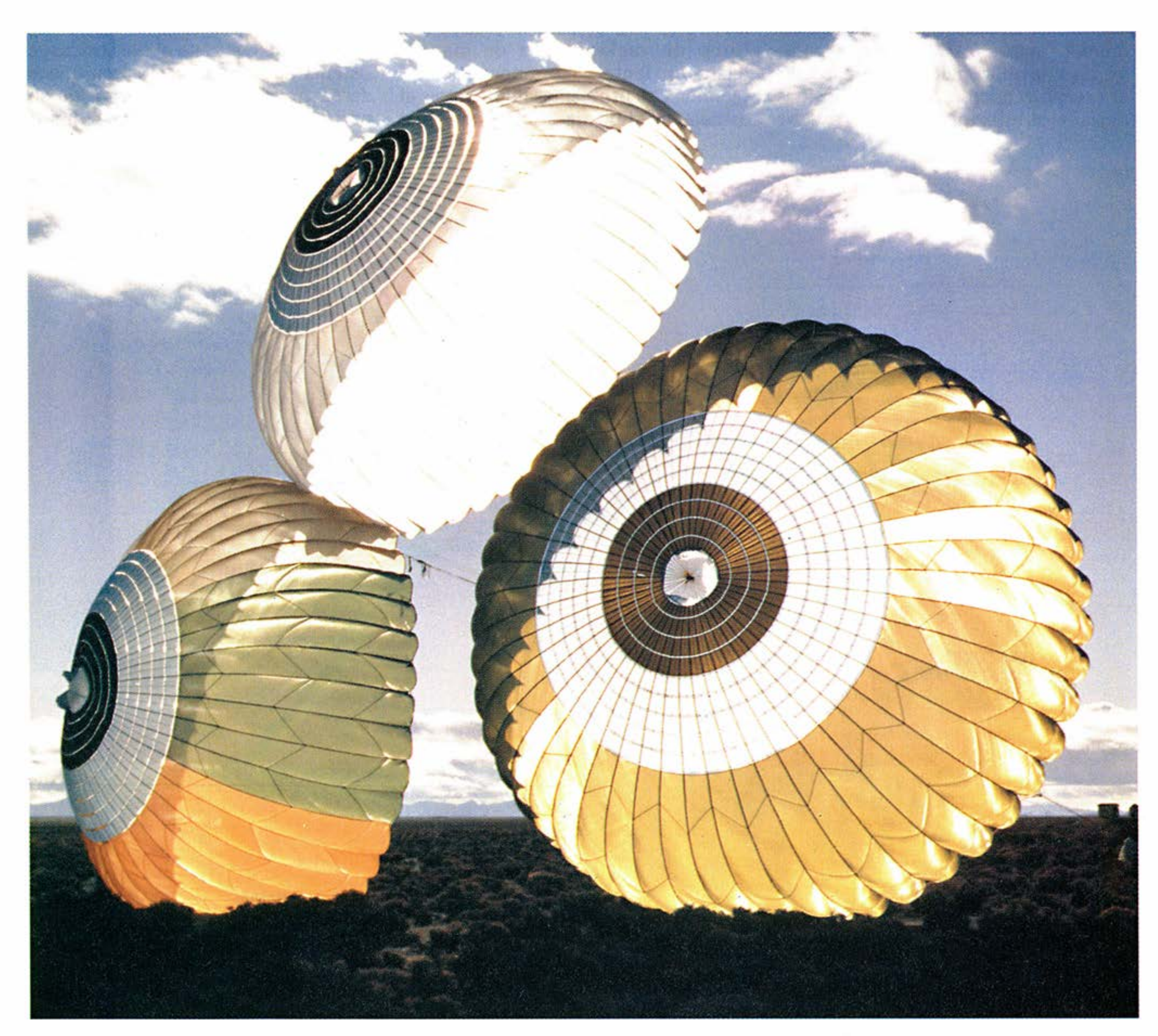
guerra mundial los paracaídas no entraron a formar parte indispensable del material aeronáutico. Se utilizaron paracaídas para lanzar tropas y suministros, para estabilizar armas aerotransportadas y para frenar la aeronave durante el aterrizaje. Desde los años sesenta hasta la actualidad, el paracaídas ha desempeñado un papel clave en la seguridad del regreso a la tierra de naves espaciales, tanto soviéticas como americanas.

Conforme se iba generalizando su uso —primero en los globos, después en los aviones y, finalmente, en las naves espaciales—, se fueron normalizando sus principales características de diseño. La mayoría de los paracaídas inflados eran de forma hemisférica. Estaban hechos de seda, de algodón o de nylon, y se diseñaban por métodos de prueba y error.

Durante los años setenta la tecnología del paracaídas conoció avances significativos, promovida por el deseo de ingenieros militares y civiles de crear modelos para lanzamientos a bajas altitudes y altas velocidades. Estos paracaídas eran necesarios para los módulos de escape de los cazas y para el lanzamiento de suministros, bombas y misiles.

En los lanzamientos a baja altitud, el paracaídas se despliega cuando la cápsula que lo contiene se desplaza horizontalmente. Debe frenar la cápsula y orientarla verticalmente antes de que golpee contra el suelo. Este requisito obliga a los diseñadores a desarrollar prototipos que frenen la cápsula con una rapidez desconocida.

En su empeño por crear paracaídas de frenado rápido, los ingenieros buscaron nuevos materiales textiles, ligeros de peso y alta resistencia. El más prometedor era el kevlar, una fibra orgánica elaborada por la compañía Du Pont. A igualdad de peso, el kevlar opone una resistencia a la tracción dos veces mayor que la del nylon, y decuplica la del acero inoxidable. Los diseñadores supusieron, con tino, que un paracaídas fabricado en parte por kevlar proporcionaría una fuerza de frenado doble de la de otro hecho totalmente de nylon, sin comprometer la integridad estructural ni exceder las limitaciones de peso y volumen.



1. TRES PARACAIDAS DE ALTAS PRESTACIONES permanecen inflados tras una prueba de vuelo en Tonopah Test Range, en Nevada. Estos paracaídas, que pueden frenar una carga hasta 28 kilómetros por hora, forman parte de un sistema diseñado para los módulos de escape de la tripulación de cazas. Los paracaídas están fabricados con kevlar y nylon; cada uno mide 15 metros de diámetro y solamente pesa 13,6 kilogramos.

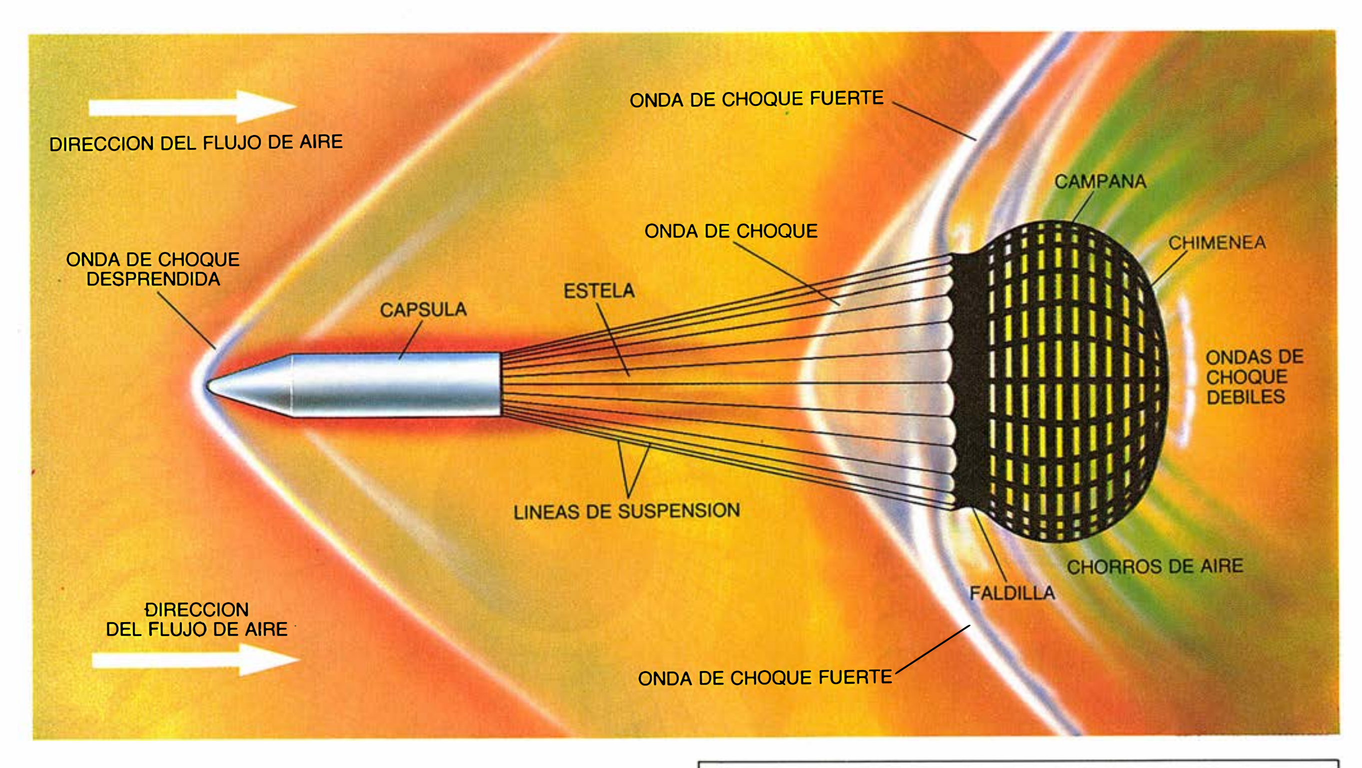
Cuando el desarrollo del kevlar y otros materiales posibilitó el diseño de prototipos de baja altitud y alta velocidad, los ingenieros comenzaron a enfrentarse a los problemas de aerodinámica no estacionaria asociados con los paracaídas de frenado rápido. Se encontraron con que muchas de sus intuiciones sobre los paracaídas tradicionales no eran aplicables a los diseños para baja altitud y alta velocidad. Casi al mismo tiempo se dieron cuenta de que el diseño de paracaídas de altas prestaciones con los métodos de prueba y error era demasiado caro en tiempo y dinero para resultar práctico. Estos factores movieron a los estudiosos de la aerodinámica a desarrollar simulaciones de ordenador del despligue de paracaídas, del inflado y de su operación.

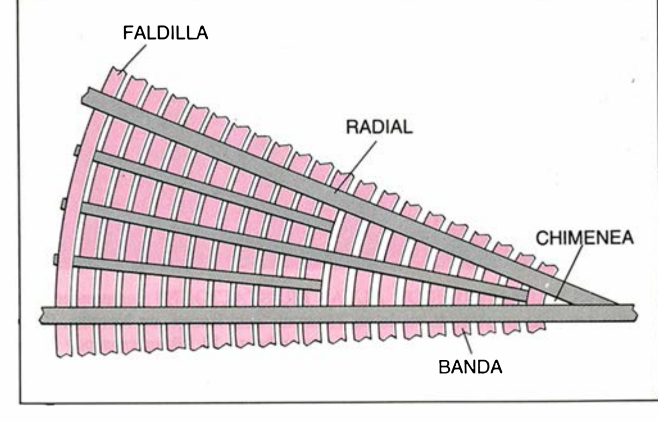
Estas simulaciones no se habían intentado antes, ni siquiera con paracaídas convencionales. Para predecir el comportamiento de un paracaídas durante el inflado, el ingeniero debe abordar algunos de los problemas más difíciles de aerodinámica. El primero: pequeños cambios en el tamaño del paracaídas, su configuración o su composición, adquieren un efecto de sorprendentes proporciones en su comportamiento. Debido a esta reacción tan sensible y errática del paracaídas ante cambios en apariencia mínimos, su comportamiento es casi imposible de predecir con métodos matemáticos. (En términos más técnicos, las ecuaciones que describen el comportamiento del paracaídas y el movimiento del aire son no lineales.)

Un segundo problema: la forma y la velocidad del paracaídas cambian rápidamente al inflarse, lo que comporta que cueste más recrear el inflado del paracaídas que, por poner un caso, el vuelo de un avión, cuya geometría es casi constante y cuyo entorno de vuelo cambia de manera bastante lenta. Nos encontramos también con problemas imponentes al estudiar el flujo de aire a través del paracaídas, la influencia de la cápsula sobre la corriente de aire y los efectos del vuelo supersónico.

Los ingenieros de paracaídas han comenzado a frecuentar el ordenador en busca de ayuda para resolver estas extraordinarias dificultades dinámicas, confiados en que les permita no sólo predecir la trayectoria del paracaídas, sino desentrañar también los esfuerzos mecánicos que sufren sus componentes. Aunque el comportamiento del paracaídas no puede predecirse en todas las circunstancias, las simulaciones por ordenador pueden describirlo (con distintos grados de precisión) durante cuatro etapas críticas: el despliegue, el inflado, el postinflado y el descenso terminal.

La etapa de despliegue comienza cuando la aeronave suelta una cápsula que contiene el paracaídas, el sistema de soporte y la carga que se desea transportar. El sistema de soporte incluye a menudo un tempori-





2. UN PARACAIDAS DE BANDAS moviéndose a velocidades supersónicas genera un flujo de aire complejo. El azul y el blanco simbolizan regiones donde la presión cambia muy rápidamente. El verde y el amarillo denotan pequeños gradientes de presión. El diagrama está basado en datos fotográficos de una prueba en túnel de viento. La campana del paracaídas bandeado (*sección a la derecha*) es una configuración de bandas y radiales, que proporcionan mayor resistencia que los paneles de una campana sólida. Un paracaídas de 1,5 metros, de diseño similar, ha frenado un proyectil de 360 kilogramos que volaba a dos veces la velocidad del sonido.

zador, que envía una señal cuando la cápsula se halla a cierta distancia de seguridad de la aeronave. La señal provoca una pequeña explosión en la popa de la cápsula, lanzando una placa de metal a la corriente de aire. La placa tira de un pequeño paracaídas piloto que se infla; éste, a su vez, saca la bolsa del paracaídas principal.

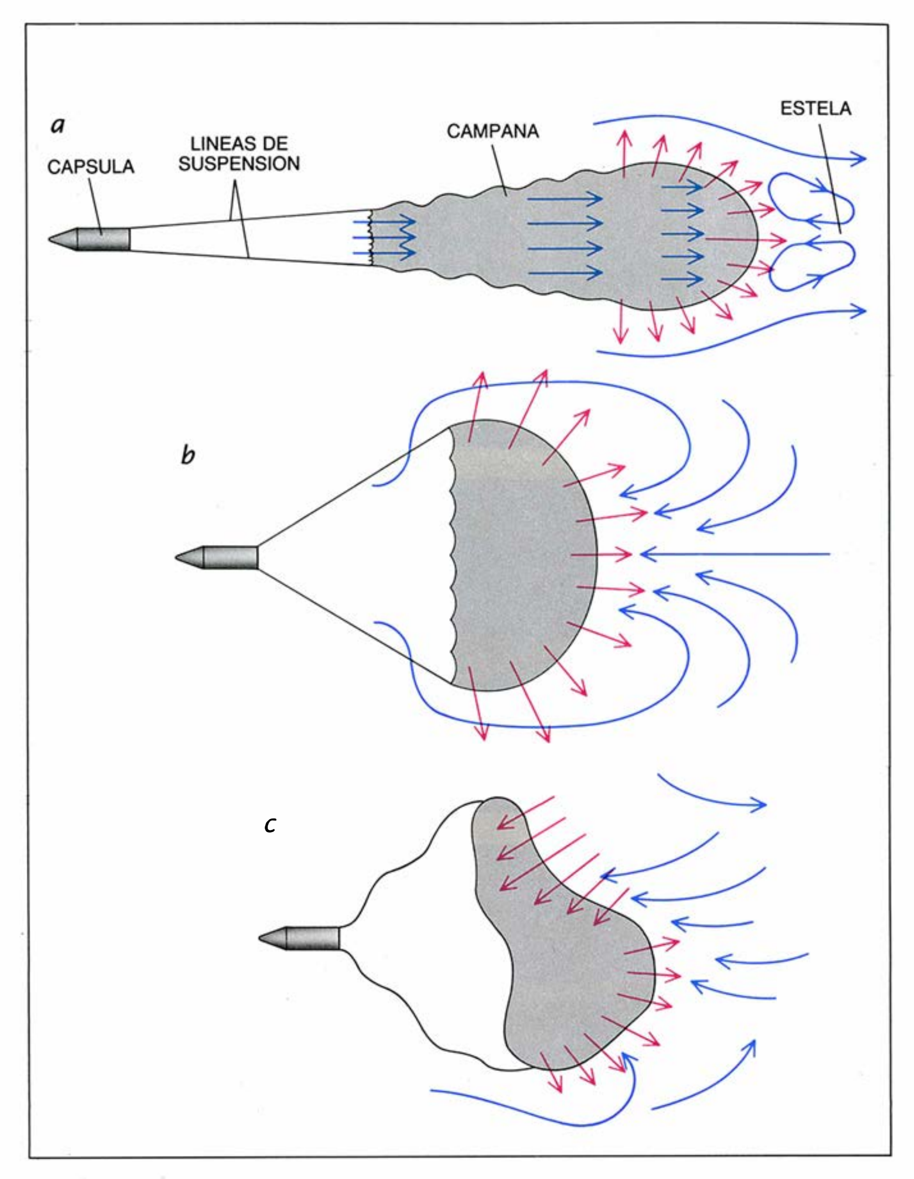
Los paracaídas de altas prestaciones pueden empaquetarse en sus bolsas con una densidad de unos 650 kilogramos por metro cúbico, que equivale a la de un tronco de roble. El paracaídas piloto debe desplegar el principal con suavidad y rapidez (en pocas décimas de segundo). Lo primero en salir de la bolsa de despliegue son las líneas de suspensión, que conectan la campana con la cápsula. Una vez extendidas las líneas de suspensión, la propia campana empieza a salir de la bolsa. Si el paracaídas se infla antes de que haya abandonado su encierro en la bolsa, puede engancharse, enredarse o desgarrarse.

Para predecir el comportamiento del paracaídas durante el despliegue y hacer mínima la probabilidad de fallo, los ingenieros de paracaídas han elaborado el LINESAIL. Este programa de ordenador sigue atentamente la fricción entre las distintas partes del paracaídas al ser empujadas a la corriente de aire y tiene en cuenta las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre los componentes que ya han entrado en ella. Además, el modelo determina la rotación y la traslación de la cápsula y de la bolsa de despliegue con respecto al paracaídas.

El LINESAIL se empleó para identificar y corregir un problema de despliegue observado en una primera prueba de vuelo del paracaídas B83, descrita al principio de este artículo. Problema que consistía en que las ondas de choque producidas por el avión F-111 tiraban del morro de la cápsula hacia arriba. Por culpa de ello, la corriente supersónica extraía prematuramente las líneas de suspensión de la bolsa. Este despliegue prematuro provocaba que las líneas volaran, la bolsa girara y la campana se rasgara. Cuando se simuló el fallo con la ayuda del LINESAIL, los ingenieros cayeron en la cuenta de que el paracaídas piloto era demasiado pequeño para controlar el despliegue de las líneas de suspensión. De nuevo gracias a la ayuda del LINESAIL pudieron diseñar un paracaídas piloto mayor.

Tras el despliegue, el paracaídas entra en la etapa de inflado e inicia su rápido frenado. Cuando se empieza a abrir la campana, ésta captura cierto volumen de aire, parte del cual fluye a través de la misma, pero el resto mayor se acelera hasta la velocidad del paracaídas. De esta forma la campana transfiere energía cinética al aire que le rodea y así se frena. La campana inflada tira entonces de las líneas de suspensión, que sujetan y frenan la cápsula. Conforme la campana recoge y acelera más y más aire, va frenando la cápsula.

Podemos controlar la fuerza de frenado y la de fricción del aire, cuya suma constituye la resistencia dinámica, cambiando la geometría y porosidad del paracaídas; aunque la resistencia dinámica está limitada en última instancia por el esfuerzo de los materiales. Dotado de especial resistencia está el paracaídas de bandas. No presenta una campana de tela sin intersticios —como sucede en los paracaídas tradicionales de tripulación y carga—, sino que la porta compuesta de "radiales" y "bandas". Los radiales son tiras de material que se extienden desde las líneas de suspensión hasta la chimenea; las bandas forman anillos perpendiculares a los radiales. Los radiales y las bandas se cosen en forma de cuadrícula que deja huecos en la campana. Aunque el paracaídas de bandas sacrifica resistencia para ganar en esfuerzo, a menudo es el diseño más apropiado cuando se buscan altas prestaciones.

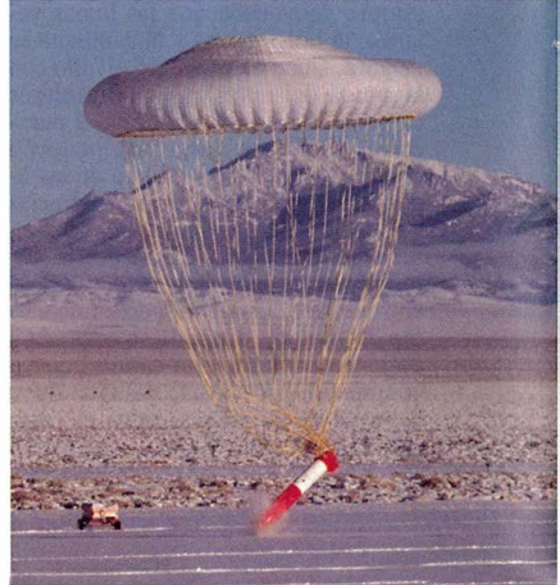


3. EL FLUJO DE AIRE (*azul*) **y las diferencias entre la presión interior y la exterior** (*rojo*) **cambian rápida y drásticamente conforme se infla el paracaídas. Durante la primera fase del inflado** (*a*)**, la campana captura aire, creando un diferencial de presión que hace que el paracaídas "resista" al aire. Cuando está completamente inflado** (*b*)**, ha transferido una energía considerable al aire, generando una estela por detrás del mismo. A medida que el paracaídas se frena, corre el peligro de que el aire de la estela alcance a la campana** (*c*)**, empujándola por detrás y haciendo que colapse.**

No toda la presión ejercida por la corriente de aire sobre la campana contribuye a la resistencia dinámica; una componente de la presión produce el inflado de la campana y asegura que el paracaídas perma-







nezca abierto durante su descenso. Al inflarse el paracaídas, primero toma la forma de un vaso largo, posteriormente guarda cierto parecido con una bombilla y al final se asemeja al sombrerillo de un hongo.

La etapa de inflado le plantea al investigador un grave problema: la forma de un paracaídas depende de las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre su campana, pero el flujo de aire, que es el que produce las fuerzas aerodinámicas, depende de la forma de la campana. Agréguese a ello que el paracaídas y su cápsula están frenándose rápidamente. Por no ser fácil dar una descripción matemática de cada uno de estos fenómenos, la tarea de elaborar un modelo que los reproduzca se torna de una complejidad extrema.

Para predecir el comportamiento exacto de un paracaídas hay que resolver las ecuaciones de su movimiento, al par que se resuelven las ecuaciones de movimiento del aire envolvente. Nadie lo ha conseguido. Pero los investigadores pueden simplificar el problema centrándose sobre un estado particular del vuelo del paracaídas, o despreciando ciertos parámetros de interés menor en el proceso de inflado. Pueden luego comprobar la precisión de sus aproximaciones comparándolas con los datos obtenidos en pruebas de vuelo real y en experimentos en túneles de viento. Así pueden determinar los parámetros importantes en cada etapa del inflado y ajustar sus modelos de ordenador para reproducir los fenómenos observados experimentalmente. Esta estrategia se ha demostrado eficaz en muchos casos.

Uno de estos modelos de ordenador es el de análisis de cargas de la campana. (Se conoce por sus siglas CALA, del inglés "CAnopy LOads Analysis".) El CALA, elaborado en 1985 por W. David Sundberg, de Sandia, se apoya en un trabajo realizado en la Northrop Corporation de Los Angeles, la Universidad de Minnesota en Minneapolis y laboratorios Sandia.

4. BOMBARDERO B-1, en vuelo por el desierto de Nevada a 1000 kilómetros por hora y su liberación del sistema de paracaídas B83. Durante los primeros 0,6 segundos, el sistema cae hasta una distancia de seguridad de la aeronave. Una pequeña explosión lanza entonces una placa de metal al aire. La placa tira de tres paracaídas piloto que despliegan el paracaídas principal a los 1,1 segundos de vuelo. Durante el segundo siguiente, el paracaídas principal se infla hasta alcanzar un diámetro de 10 metros y balancea la cápsula orientándola hacia el suelo. Cuatro segundos después de su lanzamiento, nuestro paracaídas ha descendido ya 45 metros y toma tierra a una velocidad de 85 kilómetros por hora.

Antes de empezar el programa CALA, el ingeniero debe introducir las dimensiones de la campana y las propiedades del material (peso y resistencia a la tracción), tanto de la campana como de las líneas de suspensión. El CALA divide cada parte del paracaídas en cierto número de elementos de cálculo. Para cada elemento, el ingeniero debe introducir la diferencia de presión entre el interior y el exterior de la campana. Entonces CALA calcula la posición estacionaria de cada elemento, las fuerzas entre los distintos elementos y el esfuerzo de cada uno de ellos.

Las predicciones obtenidas con el programa CALA se han sometido a comprobación en el túnel de viento. El programa ha sido particularmente útil para averiguar la máxima cantidad de esfuerzo que un paracaídas puede resistir, permitiendo así que los ingenieros seleccionaran los materiales más ligeros que puedan controlar las fuerzas aerodinámicas.

Sin embargo, las predicciones del CALA y otros programas similares son limitadas, pues los ingenieros carecen de información adecuada sobre las distribuciones de presión en la campana. Estos datos son difíciles de obtener experimentalmente, debido a que el flujo de aire a alta velocidad suele arrancar los indicadores de presión sujetos al paracaídas.

Simular el flujo de aire y las distribuciones de presión constituye otro problema arduo de la etapa de postinflado, cuando el paracaídas está completamente inflado y su velocidad ha disminuido bastante. El frenado rápido del paracaídas acelera un gran volumen de aire. Si esta masa de aire en rápido movimiento alcanza posteriormente al paracaídas, lo empujará desde atrás. El empuje de aire desde atrás hace que la campana se deforme, reduciendo sustancialmente la resistencia aerodinámica. En casos de colapso grave, la cápsula puede llegar a acelerarse de manera peligrosa.

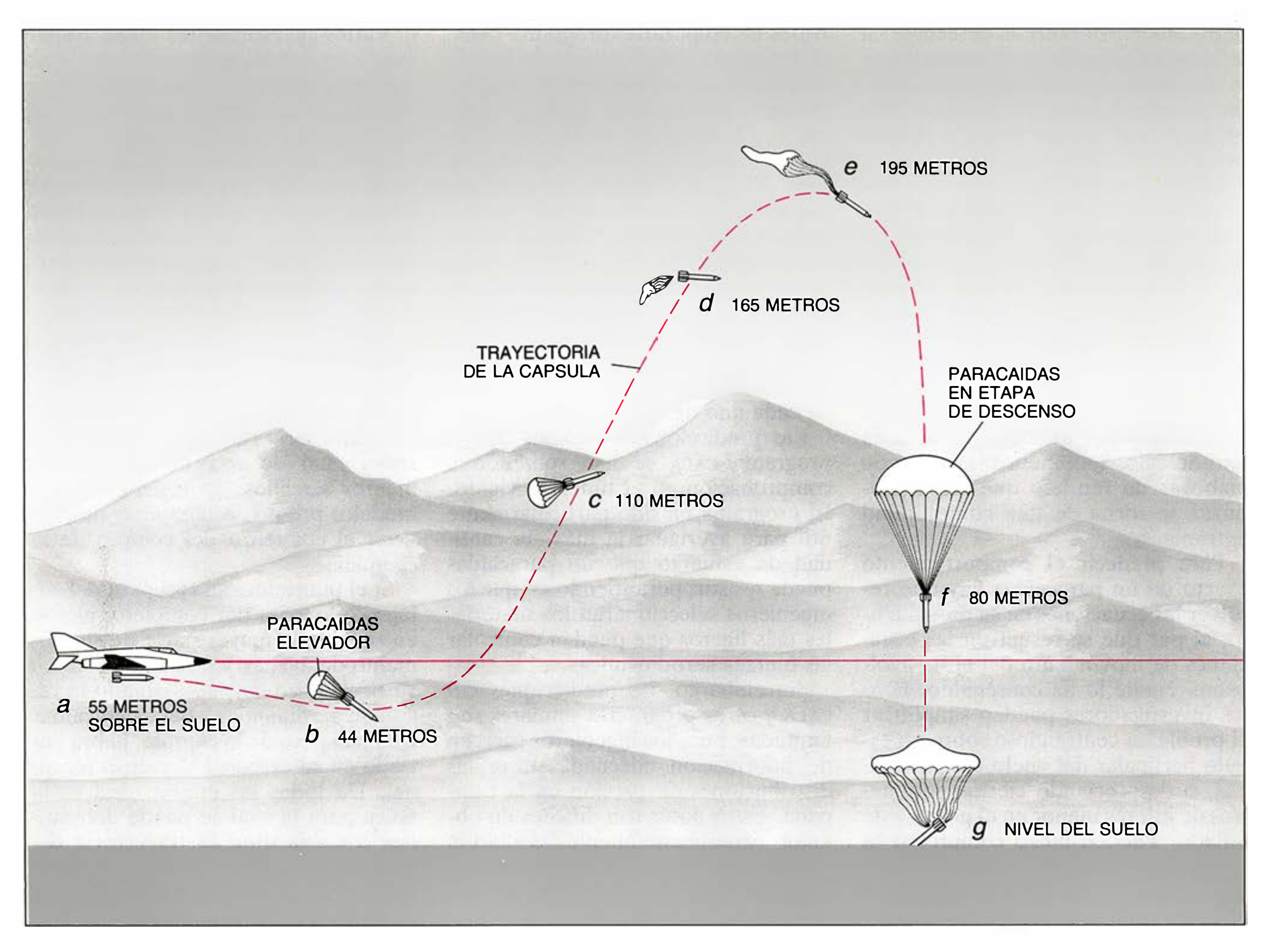
Para pronosticar las condiciones que pueden provocar el colapso de la campana se necesita un programa de ordenador que reproduzca el flujo de aire alrededor del paracaídas. Como en el vuelo del paracaídas interviene un enorme volumen de aire —normalmente varios millones de metros cúbicos—, no hay ordenador capaz de resolver las ecuaciones completas del movimiento durante todo el descenso del paracaídas. Por tanto, el investigador debe reducir el trabajo del ordenador introduciendo técnicas analíticas ingeniosas y asumiendo simplificaciones válidas.

Varios investigadores están trabajando en modelos aproximados que puedan predecir el flujo de aire alrededor del paracaídas. Los modelos se basan en la suposición de que las características aerodinámicas del paracaídas resultan, principalmente, de la diferencia de presiones a ambos lados de la campana, más que de la fricción del aire que surca. Esta hipótesis permite a los ingenieros crear un modelo de ordenador que sólo ha de ocuparse de seguir los cambios de velocidad y presión en las proximidades de la campana. Aunque estos modelos son rudimentarios, con ellos se ha obtenido una serie de resultados que parecen estar de acuerdo con experimentos sencillos. Se espera que los modelos pronto sean capaces de predecir el comienzo del colapso de la campana.

Si el paracaídas se recupera del colapso o lo evita por completo, pierde en seguida la mayor parte de su momento de avance y desciende sólo en vertical. Poco después, cuando la resistencia dinámica del paracaídas iguala el peso de la cápsula, habrá entrado en su etapa de descenso terminal. De todas las etapas, ésta es la única para la cual se puede determinar con exactitud la trayectoria del paracaídas. Muchos prototipos se diseñan para su empleo exclusivo en la etapa de descenso terminal; a la mayoría de ellos no les concierne, por supuesto, el problema del colapso del casquete u otros del mismo tenor. Sin embargo, muchos de los paracaídas de altas prestaciones se diseñan para aterrizar antes de que lleguen a alcanzar la etapa de descenso terminal. Por ironía de las cosas, la única etapa del vuelo del paracaídas que puede describirse con exactitud es la que quizá nunca experimenten estos paracaídas de altas prestaciones.

Los materiales de alta resistencia y las técnicas de diseño avanzado han creado una nueva generación de paracaídas que exceden en nivel de prestaciones a todos los anteriores. Estos paracaídas avanzados han batido marcas de velocidad. Un paracaídas que sólo pesa 270 gramos y mide 0,5 metros de diámetro ha frenado el morro de un vehículo de reentrada que viajaba a 3500 kilómetros por hora, o sea, Mach 2,8. (Este paracaídas está fabricado totalmente con kevlar, porque el calentamiento aerodinámico derritiría un paracaídas de nylon que se moviera a Mach 2,8.)

Los paracaídas avanzados han permitido el aterrizaje de cargas más pesadas que nunca. Cada uno de los



5. GRACIAS AL PARACAIDAS ELEVADOR las cápsulas superan su altitud de lanzamiento. La cápsula cae (*a*) hasta que el paracaídas elevador se infla (*b*). Conforme avanza a rauda velocidad, el paracaídas genera más sustentación que resistencia (*c*). El paracaídas elevador se desengancha segundos después (*d*) y se despliega otro paracaídas convencional (*e*). La cápsula desciende (*f*). El paracaídas y la cápsula aterrizan sanos y salvos (*g*).

propulsores de combustible sólido de la lanzadera espacial lleva instalado un paracaídas de 16,5 metros. Los paracaídas se despliegan después de que los propulsores hayan impulsado el vehículo hacia su órbita y se hayan separado de la nave. Cada paracaídas aporta una fuerza de frenado máxima de 38.000 newton a cada uno de los propulsores de 87.000 kilogramos. Una vez que los paracaídas han frenado a los propulsores de combustible sólido, se despliega un trío de paracaídas de bandas, que bajan los propulsores hasta el océano a 90 kilómetros por hora.

Algunos paracaídas avanzados pueden incluso elevar sus cargas a altitudes superiores a la de su lanzamiento. Por ejemplo, un paracaídas de bandas puede generar sustentación, además de resistencia, si se bloquean los huecos entre las bandas en la zona de la chimenea. Si el paracaídas se despliega a alta velocidad, la sustentación excederá el peso de la cápsula y la carga, provocando el ascenso del paracaídas. Uno de estos paracaídas elevadores, que transportaba un misil de 1100 kilogramos, se elevó 140 metros por encima de su altitud de lanzamiento antes de desplegar otro paracaídas convencional mayor que acarreó la cápsula suavemente hasta el suelo.

Los paracaídas siguen siendo el método más eficaz y económico de frenar cargas en la atmósfera. Las próximas dos décadas conocerán mayores avances en su tecnología. Se están desarrollando modelos de ordenador que toman en consideración los cambios en la forma, el frenado y las fuerzas aerodinámicas durante el vuelo del paracaídas. Los nuevos materiales de alta resistencia, como los tejidos fabricados con fibra de carbono, podrían facilitar el diseño de paracaídas cuyo despliegue quintuplicara la velocidad del sonido. Estos paracaídas hipersónicos asegurarían que los astronautas pudieran escapar sin peligro de una nave espacial averiada. En un futuro próximo, los paracaídas podrían recibir el beneficio de otras tecnologías, como sensores, ordenadores de tiempo real y sistemas de control, que mejorarían sus prestaciones gracias al control activo de la resistencia aerodinámica durante el inflado. Me pregunto si los paracaídas que se construyan dentro de 20 años nos parecerán tan extraños y espectaculares como los paracaídas de hoy se lo parecerían a Leonardo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

RECOVERY SYSTEMS DESIGN GUIDE. E. G. Ewing, H. W. Bixby y T. W. Knacke. U. S. Air Force AFFDL-TR-78-151, diciembre de 1978.

APPLICATION OF KEWLAR TO PARACHUTE SYSTEM DESIGN. C. W. Peterson, W. B. Pepper, D. W. Johnson y I. T. Holt en *Journal of Aircraft*, vol. 23, n.º 1, págs. 87-92; enero de 1986.

THE AERODYNAMICS OF PARACHUTES. D. J. Cockrell. NATO's Advisory Group for Aerospace Research and Development AGARDograph n.º 295, julio de 1987.

AIAA 10TH AERODYNAMIC DECELERATOR SYSTEM TECHNOLOGY CONFERENCE, Cocoa Beach, Florida. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 18-20 de abril de 1989.

Leonardo Torres Quevedo

Su tarea pionera en automática, conceptual y práctica, reclama el estudio de su singular aportación inventora en múltiples campos

Francisco González de Posada

El hombre, todavía, puede a la máquina. El campeón del mundo de ajedrez Gary Kasparov venció al programa de ordenador más potente diseñado para ese juego, "Pensamiento profundo", por dos a cero. Pero los especialistas se han apresurado a afirmar que se trata del canto del cisne. Antes de cinco años, se aventura, el ordenador se alzará con la victoria. Muy pocos saben que el primer diseño de una máquina que jugaba al ajedrez fue de un español: Leonardo Torres Quevedo.

Nació en la aldea de Santa Cruz de Iguña, municipio de Molledo, en la actual región de Cantabria, el 28 de diciembre de 1852. Fueron sus padres Luis Torres Vildósola y Urquijo, ingeniero de caminos de origen vasco y andaluz, y Valentina Quevedo de la Maza, de neta ascendencia montañesa. Comenzó sus estudios de formación secundaria en Bilbao y los completó en París. En 1870 se instala con su familia en Madrid y, al año siguiente, ingresa en la Escuela Oficial del Cuerpo de Ingenieros de Caminos, cuyos estudios termina en 1876. Ejerce durante unos meses la profesión en trabajos ferroviarios, pero renuncia a ella, según testimonio personal, "para dedicarse a pensar en sus cosas", y realiza un viaje por Europa, para volver muy pronto al valle de Iguña, donde contrae matrimonio en 1885 con Luz Polanco Navarro. En 1889 se traslada definitivamente a Madrid y su biografía se identifica, a partir de entonces, con su obra inventora. Muere en Madrid el 18 de diciembre de 1936.

Torres Quevedo poseía una extraordinaria capacidad inventiva, como demuestra el elevado número de patentes que registró, en temas tan dispares como los funiculares, la señalización, el telekino, los globos dirigibles, las máquinas taquigráficas, la binave, los enclavamientos ferroviarios, las máquinas de escribir, la paginación de libros, el puntero proyectable o el proyector didáctico. Aquí, empero, nos ceñiremos a cuatro logros fundamentales, de resonancia en la historia contemporánea de la ciencia y la técnica: las máquinas algébricas, la automática, los transbordadores y los dirigibles.

Las máquinas de calcular se dividen en analógicas, si utilizan variables continuas, y digitales, si emplean variables discretas. Las computadoras analógicas son máquinas de cálculo en las que los números se representan mediante cantidades de una o varias magnitudes físicas determinadas; magnitudes físicas que pueden ser de muy distinta naturaleza: longitudes, desplazamientos, rotaciones de ejes, potenciales eléctricos, intensidades de corriente, etcétera. En las computadoras de este tipo, unas ecuaciones matemáticas (algébricas) se representan mediante un proceso operacional, de cantidades físicas, que resuelve un problema físico análogo, o analógico, cuya solución numérica —medida de la cantidad de otra magnitud, o de la única puesta en juego— es la solución de la ecuación matemática. En resumen, un problema matemático se resuelve mediante un modelo físico, de tal manera que el resultado físico es una cantidad de una magnitud física cuya medida en la unidad coherente es el resultado matemático de la ecuación algebraica.

El sistema físico analógico queda constituido en modelo físico de la ecuación matemática. Estas calculadoras analógicas son, pues, de las denominadas de variables continuas. Sus principios se han ido adaptando a nuevas técnicas, cada vez más precisas, acordes con el desarrollo de la física; así, han avanzado desde un tipo geométrico o prefísico hasta el actual tipo electrónico, pasando por las etapas intermedias de tipo mecánico y electromecánico.

Los estudios y aportaciones de Torres Quevedo en este campo de las máquinas analógicas se sitúan en la segunda fase, en la de tipo mecánico. Tanto sus concepciones teóricas como sus creaciones tecnológicas se basan en la cinemática de mecanismos, de modo que establece relaciones entre los valores simultáneos de los desplazamientos, o giros realizados por varios móviles; la máquina impone a las variables las relaciones expresadas por las fórmulas matemáticas. El las denominó máquinas algébricas, nombre con el que han pasado a la historia.

En 1893, cumplidos los 40 años, presenta ante la Academia de Ciencias de Madrid su *Memoria sobre las máquinas algébricas*, que fue calificada por Eduardo Saavedra, ingeniero de caminos y académico, como "suceso extraordinario en el curso de la producción científica española". En síntesis, esta primera máquina para resolver ecuaciones pretende "resolver las ecuaciones numéricas de todos los grados... con magnitudes continuas. Tiene por objeto producir de una manera continua y automática

FRANCISCO GONZALEZ DE POSADA es catedrático de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid. Es doctor ingeniero de caminos, canales y puertos, licenciado en filosofía y letras y en ciencias físicas. Ha sido catedrático de la Universidad de Santander y rector de la misma. En el tema objeto de su artículo ha sido promotor de numerosas iniciativas y autor de varias monografías. González de Posada quiere dejar constancia de la deuda contraída con su maestro José García Santesmases en la redacción del artículo.

los valores sucesivos por los que va pasando un polinomio racional y entero, a medida que la variable crece o disminuye y en este concepto podría denominarse generador de polinomios. Tres órganos esenciales componen la nueva máquina, a saber: el generador de cantidades, el generador de monomios y el generador de sumas" (Saavedra).

¿Cuáles habían sido los antecedentes? Antes de Torres Quevedo se habían realizado numerosos intentos, como recordara el recientemente fallecido José García Santesmases, de la Universidad Complutense de Madrid. El antecedente más remoto podríamos situarlo en la calculadora aritmética de Blaise Pascal, que sería perfeccionada por F. K. Roth. En 1810, Jacques-Etienne Bérard propone su balanza algébrica, que era una máquina basada en la ley de la gravedad y, en 1839, Leon L. C. Lalanne otro modelo fundado en el principio de la romana. James C. Maxwell, en 1855, y J. Thomson, en 1860, diseñan un integrador —un analizador diferencial— de disco mecánico, realizado con cierta perfección casi un siglo después, en 1945, por V. Bush y S. H. Caldwell. Eduardo Stamm aborda, en 1863, el problema en toda su generalidad y su aparato, perfeccionado en 1892 por Federico Carducci, presentaba todavía graves inconvenientes mecánicos. En 1886, Sir Charles V. Boys inventa una máquina con grupos de palancas que determina las raíces de una ecuación. No hay constancia documental de que este conjunto de indudables antecedentes históricos fueran realmente antecedentes conocidos por Torres Quevedo, quien había estado recluido, aislado, en soledad científica y cultural en el valle de Iguña. Sí es probable, en cambio, que, una vez en Madrid y después del estéril viaje a Suiza para presentar el proyecto de su transbordador, y dedicado por completo a las máquinas algébricas, contrastara su visión con los conocimientos que pudiera haber adquirido en París por estas fechas.



1. LEONARDO TORRES QUEVEDO nació en Santa Cruz de Iguña, municipio de Molledo, en la actual región de Cantabria, el 28 de diciembre de 1852 y murió en Madrid el 18 de diciembre de 1936. Dotado de una extraordinaria capacidad inventiva, este ingeniero de caminos registró un elevado número de patentes, en temas muy dispares; los de mayor resonancia en la historia de la ciencia y la técnica fueron las máquinas algébricas, la automática, los transbordadores y los dirigibles.

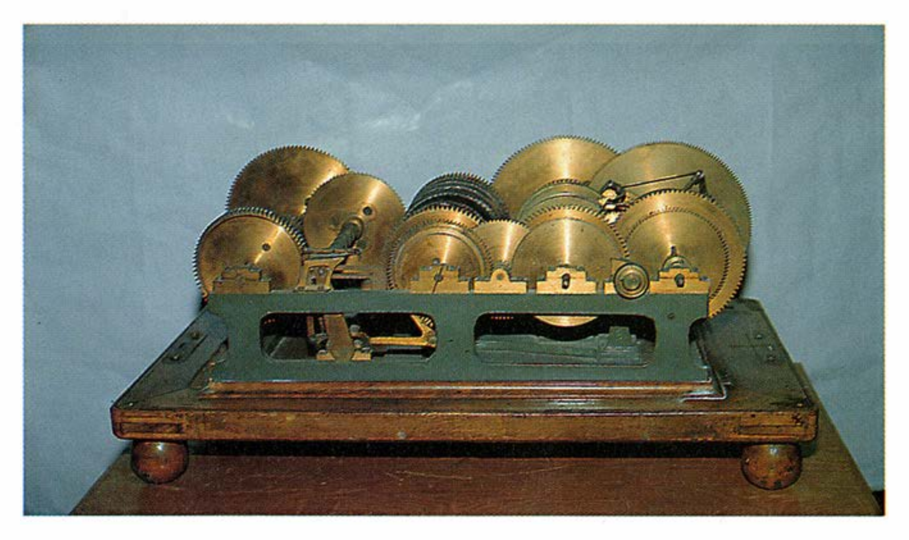
Los tres generadores de la máquina de Torres son sistemas mecánicos que establecen las relaciones convenientes entre sus movimientos para representar las correspondientes operaciones algebraicas. El generador de cantidades, original del cántabro y bautizado por Saavedra con el nombre de aritmóforo, sirve para representar los números mediante una escala logarítmica en una rueda graduada de 1 a 10 (para obtener todas las mantisas posibles de los logaritmos) y otra rueda contadora de vueltas (para representar las características crecientes o decrecientes de los logaritmos).

El generador de monomios, llamado tren epicicloidal, convierte en suma, mediante el empleo de logaritmos, la operación necesaria para construir un monomio: $\log Ax^n = \log A + n \log x$. No puede considerarse original; hasta cierto punto, había sido ya utilizado por Stamm.

El generador de sumas o generador de polinomio —el llamado husillo sin fin, que es el órgano fundamental de la máquina— constituía, en opinión de Saavedra, "lo más curioso y original del invento" y "un mecanismo acerca del cual no hay el menor antecedente". Este sistema mecánico inventado por Torres Quevedo permitía calcular el logaritmo de una suma resolviendo el complejo y difícil problema de su representación mecánica. Considerando la suma de dos términos del polinomio, u y v, que son los monomios $u = A_m x^m$ y $v = A_p x^p$, pretende obtener el $\log (u + v)$ de tal manera que sea factible su mecanización. Mediante un cambio de variables apropiado resuelve el problema, habida cuenta de que la suma de dos logaritmos la ha resuelto previamente.

Por otra parte, las condiciones que considera Torres Quevedo que deben reunir las máquinas algébricas para superar satisfactoriamente las dificultades prácticas son tres: la primera, emplear aritmóforos logarítmicos (para mayor precisión de los valores entre extremos grandes y para la uniformidad o constancia de los errores relativos); en segundo lugar, prescindir de transmisiones por contacto, acudiendo siempre a enlaces geométricos (para evitar errores de resbalamiento), y, por último, admitir exclusivamente mecanismos sin fin (para no limitar la amplitud de las variables). Con esas tres condiciones se propone reducir los errores sin limitar los valores de las variables.

Su insistencia en ese campo se refleja en la publicación de distintos estudios sobre el particular, de los que destacaríamos la comunicación *Sur*



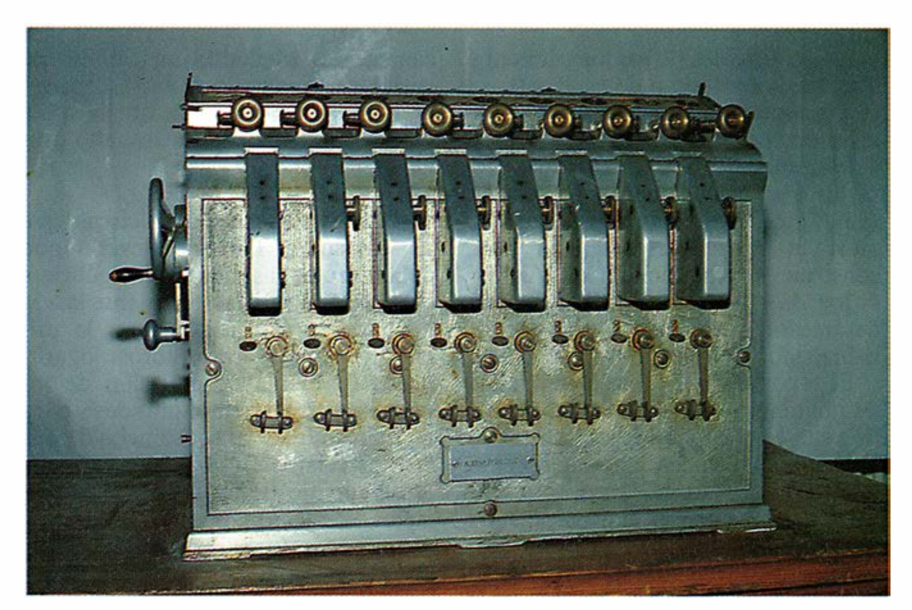
2. HUSILLO SIN FIN. Sistema mecánico absolutamente original de Torres Quevedo del que no existe ningún tipo de precedente y que es el órgano fundamental de la máquina de calcular algébrica (o analógica). Permite obtener el logaritmo de una suma como suma de logaritmos resolviendo el complejo y difícil problema de su representación mecánica. En la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, de la Politécnica de Madrid, se conservan varios ejemplares.

les machines algèbriques en la Academia de Ciencias de París, en 1895, y, en 1900, una memoria *Sur les machines à calculer*, que concluye proyectando la máquina para resolver la ecuación $\alpha = A_1x^{n_1} + \ldots + A_5x^{n_5} \,/\, A_6x^{n_6} + \ldots + A_8x^{n_8}$. La comisión que juzgó esta última memoria estaba constituida por J. Henri Poincaré, Paul Apell y Marcel Deprez, cuyo dictamen reza: "En resumen, el señor Torres ha dado una solución teórica general y completa del problema de la construcción de las relaciones algébricas y trascendentes por medio de máquinas; además, ha construido, efectivamente, máquinas de manejo cómodo para la resolución de ciertos tipos de ecuaciones algébricas que se presentan frecuentemente en las aplicaciones. La Comisión pide a la Academia que ordene la inserción de la Memoria del señor Torres en la colección de sabios extranjeros". La máquina de calcular las raíces de una ecuación de ocho términos se comenzó a construir en 1910 y se terminó en 1920.

En este apartado de computadoras analógicas llegó aún mucho más lejos; inventó medios curiosísimos para construir máquinas que hallaran raíces imaginarias y no sólo las raíces reales; construyó, asimismo, una máquina para resolver la ecuación de segundo grado con coeficientes complejos e ideó un integrador original para resolver mecánicamente la ecuación $y' = dy/dx$.

En 1914, Torres Quevedo publica en la *Revista de la Real Academia de Ciencias*, de Madrid, una memoria con el título *Ensayos sobre Automática. Su definición. Extensión teórica de sus aplicaciones.* En esa obra pionera, donde se introduce hasta el nombre de la nueva ciencia, nos muestra dos tipos de autómatas "según que las circunstancias que regulan su acción actúen de un modo continuo o que, por el contrario, lo hagan bruscamente o por intermitencias". Es decir, si la variación tiene lugar de forma continua, se trata de sistemas analógicos (sus máquinas algébricas, el integrador) y, si la variación es por intermitencias, se trata de sistemas digitales, numéricos o discretos; en este segundo caso introduce la idea de los circuitos de conmutación mediante relés, única posibilidad en aquella época.

En esa memoria enuncia los fundamentos teóricos de la automática, expone un proyecto de sistemas para realizar operaciones aritméticas por procesos digitales, desarrolla un procedimiento original para comparar dos cantidades (operando con unos dispositivos que registran los valores numéricos, *k'* y *k''*, en unas reglillas mediante sistemas electromecánicos con conmutadores rotatorios, de tal manera que una escobilla, extremo final del comparador, hace contacto con uno de los plots de otra regla: *1*, si *k'* es mayor que *k''*; *2*, si ambos valores numéricos son iguales, o *3*, si *k'* es menor que *k''*); diseña un autómata sencillo (que calcula la fórmula $\alpha = ax\,(y-z)^2$, de tal modo que para cada conjunto de valores de a, *x, y, z* el autómata ejecuta todos los cálculos, imprime los resultados y comunica que la operación ha concluido, para lo cual el autómata consta de dos aritmómetros —para la resta y el pro-

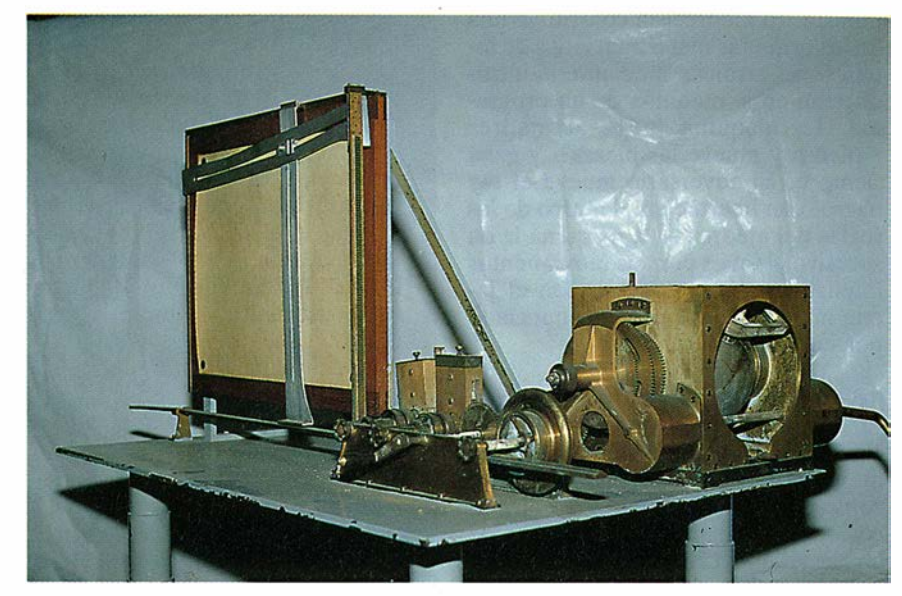


3. MAQUINA DE RESOLVER ECUACIONES ALGEBRICAS concebida y explicada, en 1900, en la memoria *Sur les machines à calculer* que presentó a la Academia de Ciencias de París. Se comenzó su construcción en 1910 y se terminó en 1920, exhibiéndose en París. Resuelve, con carácter general, la ecuación $A_1x^{n_1} + A_2x^{n_2} + \ldots + A_8x^{n_8} = 0$. Se separan los términos positivos y negativos de modo que se considera la expresión $\alpha = (A_1x^{n_1} + \ldots + A_5x^{n_5}) \,/\, (A_6x^{n_6} + \ldots + A_8x^{n_8})$. Se inscriben los valores de los coeficientes $A_1, A_2, \ldots, A_8$ en los correspondientes aritmóforos (8 pares de círculos de la parte superior delantera, con manivela frontal) y variando el de x (el par del extremo derecho, con la palanca lateral) hasta que se verifique $\alpha = 1$, solución de la ecuación. Procediendo con continuidad en la variación de x se obtienen las diferentes soluciones —raíces— de la ecuación.

ducto—, un comparador, para efectuar adecuadamente la resta $y-z$, y un tambor con un conjunto de punteros o plots que pueden contactar con unas escobillas); y se refiere a Charles Babbage y a su célebre máquina analítica, destacando que la causa de su fracaso había sido el uso de procedimientos mecánicos exclusivos.

Torres Quevedo, cuya aportación en el tema de las máquinas analógicas lo sitúa en la fase mecánica, se decide en automática por el uso de sistemas electromecánicos, haciendo ver que en éstos radica el futuro. El antecedente de esta memoria lo encontramos ya en un artículo, publicado en Buenos Aires tres años antes en la revista *La ingeniería*, titulado "Sobre un nuevo sistema de máquinas de calcular electromecánicas".

Los autómatas, según nuestro autor, tendrán sentidos (aparatos sensibles a las circunstancias externas), poseerán miembros (aparatos capaces de ejecutar operaciones), dispondrán de energía necesaria y, además, y sobre todo, tendrán capacidad de discernimiento (objeto principal de la automática), de elección entre diferentes opciones.

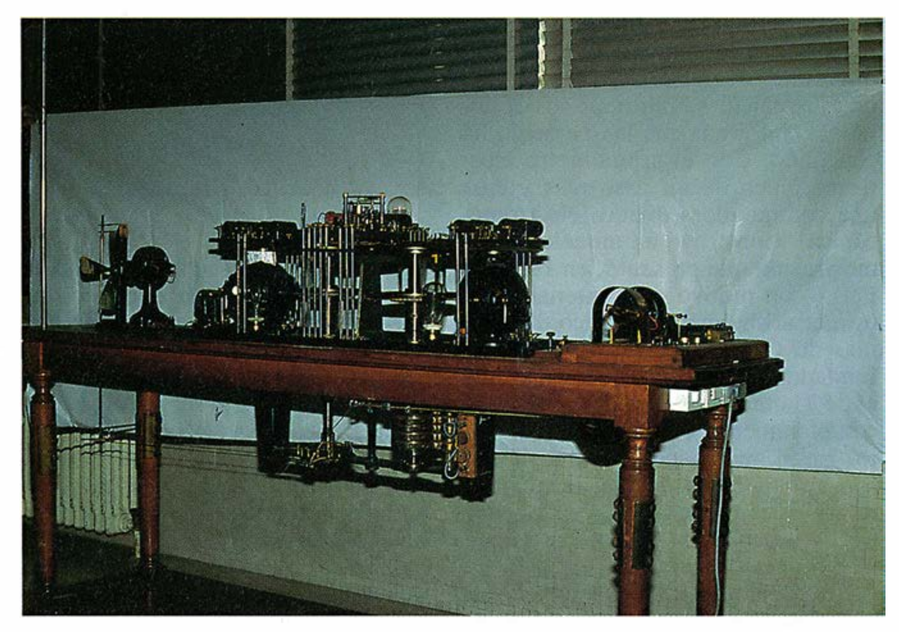


4. EL INTEGRADOR. Se presentó en la Academia de Ciencias de París con el título "Construction mécanique de la liaison exprimée par la formule $y' = dy/dx$" (*Comptes rendus*, 30.1.11). Construye mecánicamente la ecuación $y' = dy/dx$ y la resuelve. Consta de una esfera de cobre que puede girar libremente alrededor de su centro, que permanece fijo por la acción de cinco ruedas tangentes, de modo que el movimiento de estas ruedas y la rotación de la esfera están relacionadas para resolver la ecuación diferencial con las correspondientes condiciones iniciales. El movimiento de las ruedas da lugar a otros dos movimientos perpendiculares (sistema cartesiano de coordenadas en el tablero); recíprocamente, si el índice sobre el tablero describe una curva $y = f(x)$ desplazando los ejes coordenados, este movimiento se transmite por mediación de las ruedas generando el giro de la esfera.

Tres son los aparatos o máquinas principales que fueron simultáneamente alumbradores y consecuencia de sus concepciones sobre automática: el telekine o telekino, el ajedrecista y el aritmómetro electromecánico.

El telekino es un autómata que ejecuta las órdenes que se le envían (por telegrafía sin hilos). Constituye el primer aparato de radiodirección (o teledirección) del mundo. Con él se introduce el mando a distancia mediante ondas hertzianas. Cada señal emitida hace avanzar un paso a una rueda; según el número de señales recibidas —establecido por un código— mediante un conmutador se actúa en un circuito determinado y se efectúa la maniobra correspondiente. Posee un mecanismo de contacto retrasado del conmutador para que reciba la orden completa, un automatismo de vuelta a la posición inicial del conmutador y un dispositivo de seguridad que paraliza el motor si se produce avería o no se reciben señales durante un determinado período de tiempo. Su idea inicial estuvo orientada hacia las pruebas de dirigibles con objeto de no poner en peligro vidas humanas. En 1903 presentó una memoria en la Academia de Ciencias de París (*Sur le telekine*) e hizo una demostración experimental con un primer prototipo y patentó su invento. Pruebas públicas se repitieron con un triciclo en el frontón Beti-Jai, de Madrid, en 1904, en una barca de la ría bilbaína del Nervión (1905), en un bote en el estanque de la Casa de Campo de Madrid (1906) y, ese mismo año, ante Alfonso XIII y una gran multitud en Bilbao.

El ajedrecista es una máquina de tipo electromecánico, la primera en su género, aunque fuera sólo para un pequeño problema —jaque de torre y rey contra rey— con resultado deter-



5. EL TELEKINO. Creación torresquevediana doblemente primigenia en el mundo: en el ámbito de la automática y en el del mando a distancia. Desde un emisor se envían ondas hertzianas —telegrafía sin hilos— hasta el receptor, que las recibe mediante un código cifrado y ejecuta las órdenes correspondientes. El acontecimiento más famoso tuvo lugar en Bilbao: en presencia de Alfonso XIII, una gran multitud contempló asombrada el movimiento de una barca en la ría del Nervión que ejecutaba fielmente las órdenes que se le mandaban desde el puesto de mando establecido en tierra.

minista. El ajedrecista constituye una de las primeras manifestaciones de inteligencia artificial mediante la introducción en la máquina de un programa. La máquina juega al ajedrez —piensa y mueve las piezas— y gana siempre. El adversario mueve el rey negro, con libertad en el marco de las reglas del ajedrez, y la máquina le da sucesivos jaques por sus movimientos inteligentes hasta concluir con el jaque mate que, además, es anunciado por un gramófono.

Torres Quevedo construyó dos ajedrecistas, uno en 1912 y otro en 1920. El segundo perfecciona al primero en intrascendentes aspectos constructivos mecánicos y electrónicos, y se presentó en el Congrès de Cybernétique celebrado en el Conservatoire des arts et des métiers de París en 1922. En ambos, la estructura mecánica para lograr el movimiento de las piezas blancas consiste en un conjunto de ejes, tambores, trenes epicicloidales y lanzaderas que permiten las traslaciones longitudinales y transversales de las piezas por el tablero. La estructura electromecánica se basa en un conjunto de electroimanes y dispone de automatismos electromecánicos que se corresponden con las diferentes posibilidades de las reglas del juego.

La concepción de una calculadora digital mediante sistemas electromecánicos convirtió a Torres en pionero de la automática actual en buena parte de sus principales componentes y tareas, verbigracia, dispositivos para registrar valores numéricos, realizar diferentes operaciones, ejecutar todos los cálculos, imprimir los resultados e informar que la operación ha concluido. Con el aritmómetro electromecánico da un paso más y crea una computadora digital (electromecánica). Construyó un modelo de demostración que presentó, en 1920, en París, con motivo del centenario del primer aritmómetro práctico de Thomas de Colmar: "...mi aparato está fundado en los mismos principios que el de Thomas de Colmar, pero difiere completamente en su funcionamiento. En el mío todos los movimientos son automáticos... no tiene ninguna relación con las máquinas algébricas". (Las operaciones se hacen con magnitudes discretas.)

En opinión de Torres Quevedo, "...estas máquinas pertenecen a un capítulo nuevo de la ciencia de las máquinas que se podría llamar automática." "El autómata actúa como una persona circunspecta y reflexiva: examina las circunstancias en que se encuentra para decidir lo que debe hacer y lo hace". Conviene recordar, para ponderar la importancia del trabajo de Torres Quevedo, que, hasta Babbage, las operaciones aritméticas se realizan paso a paso. En el proyecto de Babbage se introducen previamente las instrucciones y los datos; la máquina habría de realizar todas las operaciones y registrar todos los resultados. Su fracaso se debió al uso de elementos mecánicos. La originalidad y el éxito del español se debió a la introducción de elementos electromecánicos. En este período que estamos comentando —y que corresponde al decenio de 1910 a 1920—, va destacando las ventajas inherentes al sistema electromecánico que preconiza sobre los procedimientos mecánicos, incluidos los suyos de la etapa anterior. Su principal mérito en el aritmómetro consistió en proyectar la máquina de modo que ella sola, sin necesidad de control humano alguno, comparaba y decidía.

Con el nombre de transbordador, asociado a Torres Quevedo, se designa a un teleférico, un "vehículo que surca los aires, suspendido de cables, entre dos puntos elevados del terreno". Los modelos anteriores a Torres Quevedo consistían, en síntesis, en una barquilla para transportar la carga colgada de un cable por medio de una polea; el cable se hallaba sujeto a dos puntos fijos por sus extre-

HUSILLO

El "generador de sumas" o "generador de polinomio" *–husillo sin fin–*, órgano fundamental de la máquina, "es lo más curioso y original del invento" y es "un mecanismo acerca del cual no hay el menor antecedente" (E. Saavedra). La máquina de calcular de Torres Quevedo constituyó un gran avance teórico y una genialidad práctica.

¿Qué es el *husillo sin fin*? Un sistema mecánico inventado por Torres Quevedo que permite calcular el logaritmo de una suma como suma de logaritmos resolviendo el complejo y difícil problema de su representación mecánica. He aquí la solución teórica original del inventor iguñés:
Sea la suma de dos términos

$$u = A_m x^m \quad , \quad v = A_p x^p \qquad (1)$$

Se desea obtener una relación del tipo

$$\log (u + v) = \log v \left(\frac{u}{v} + 1\right) = \log v + \log \left(\frac{u}{v} + 1\right) \qquad (2)$$

El problema pendiente reside, por tanto, en mecanizar la expresión

$$\log \left(\frac{u}{v} + 1\right)$$

ya que la suma de dos logaritmos la ha resuelto con el "generador de monomios" o *tren epicicloidal.*
Mediante el empleo de logaritmos convierte en suma la operación necesaria para construir un monomio

$$\log Ax^n = \log A + n \log x$$

Hace el cambio de variables siguiente:

$$X = \log \frac{u}{v} \quad \Rightarrow \quad 10^x = \frac{u}{v} \qquad (3)$$

$$Y = \log \left(\frac{u}{v} + 1\right) = \log (10^x + 1) \qquad (4)$$

El problema (2) queda resuelto, desde el punto de vista mecánico, relacionando dos ruedas cuyos desplazamientos angulares estén ligados por (4).

SIN FIN

La curva (4) tiene por asíntotas

$$X \rightarrow -\infty, \quad Y \rightarrow 0$$
$$X \rightarrow +\infty, \quad Y \rightarrow +\infty$$

La pendiente de la curva es

$$\frac{dY}{dX} = \frac{10^x}{10^x + 1} \qquad (5)$$

$$X \rightarrow \infty, \ \mathrm{tg}\ \alpha = 1 \ \Rightarrow \ \alpha = 45^\circ$$

Puede considerarse que la curva se confunde con sus asíntotas a partir de unos valores $X = +a$ que se fijarían según el grado de aproximación deseado. Es decir, $Y \rightarrow 0$ si $X \rightarrow -\infty$; en la práctica $Y \rightarrow 0$ si $x = -a$, lo que no puede resolverse mediante un mecanismo de transmisión. Esta nueva dificultad la supera de la siguiente forma

$$Y = \log(10^x + 1) + mX - mX \qquad (m > 0) \qquad (6)$$

$$Y_1 = \log(10^x + 1) + mX \qquad (7)$$

$$Y_2 = -mX \qquad (8)$$

$$\frac{dY_1}{dX} = \frac{10^x}{10^x + 1} + m \qquad (9)$$

En (7) las asíntotas son

$$\begin{cases} X \rightarrow -\infty, & Y_1 \rightarrow -\infty \\ X \rightarrow +\infty, & Y_1 \rightarrow +\infty \end{cases}$$

$$\begin{cases} X \rightarrow +\infty, & \dfrac{dY_1}{dX} = m + 1 \end{cases}$$

$$X \rightarrow -\infty \quad \Rightarrow \quad \frac{dY_1}{dX} = m$$

Para los valores $|x| \geqslant a$ se sustituye la curva por la asíntota. El mecanismo que resuelve la ecuación, denominado "husillo sin fin", es originalísimo.

mos. La barquilla se desplazaba a lo largo del mismo mediante arrastre por otro cable. Los esfuerzos del cable soporte dependían de la carga transportada y de la posición de ésta en su recorrido.

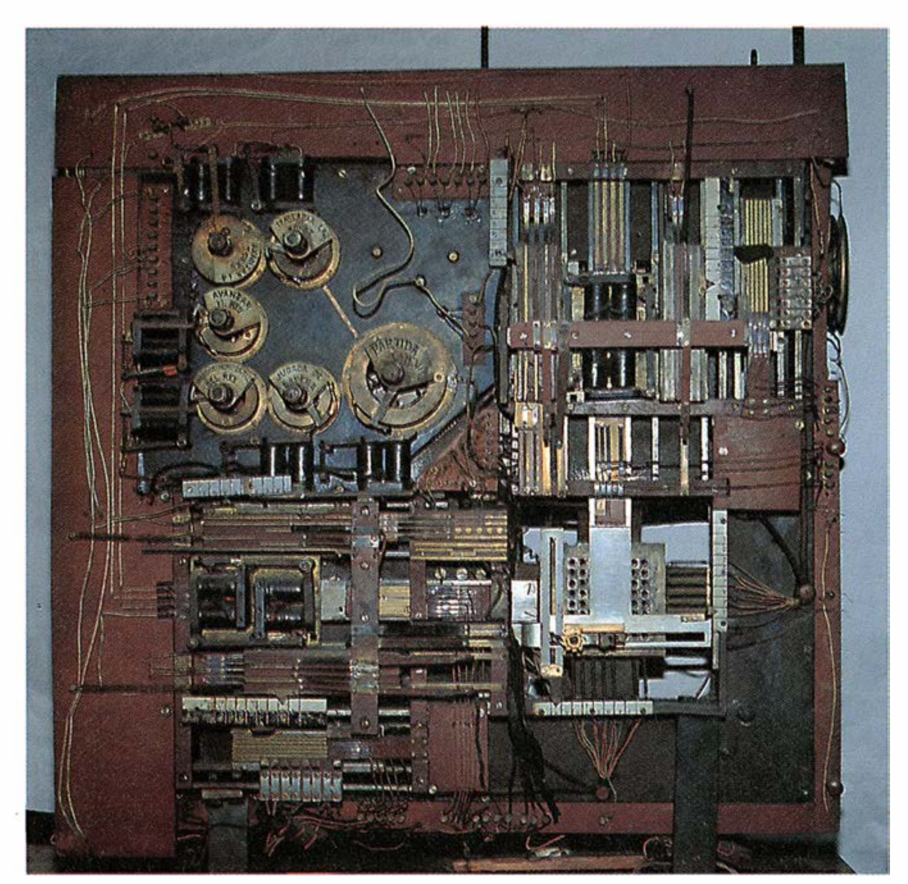
El sistema innovador de Torres Quevedo consistió, también en síntesis, en liberar un extremo del cable soporte, de suerte que pasara por unas poleas y llevara al final un contrapeso previa y adecuadamente calculado. De esta manera, el cable quedaba sometido, exclusivamente, salvo efectos de segundo orden, a las tensiones generadas por el contrapeso. Es decir, eran constantes e independientes del peso que transportara la barquilla y de la posición de ésta. Las cargas en equilibrio se lograban automáticamente, el contrapeso subía o bajaba y la longitud del cable entre extremos del vano aumentaba o disminuía, respectivamente.

Una consecuencia directa de la nueva concepción mecánica constituye la nota más característica del transbordador de Torres Quevedo: la seguridad. Si la barquilla está suspendida de varios cables soporte y se produjera la rotura de uno de ellos, el sistema se equilibraría automáticamente, de modo que subirían los contrapesos, bajaría la barquilla y cada cable restante soportaría el esfuerzo primitivo.

Las primeras pruebas las realizó en 1887 en su natal valle de Iguña, con notable éxito y, sobre todo, suficiente autoconvencimiento. En 1890 presentó el proyecto en Suiza, donde, sin embargo, fue rechazado. No se amilanó. En 1907 registraba la patente de "un nuevo sistema de transbordador". Su aplicación en el *Transbordador del Monte Uría* (San Sebastián), de 280 metros de luz y 28 de diferencia de altura entre las estaciones, transportó ya el año siguiente unos 13.000 viajeros. Esta línea de trabajo encontró colofón en el *Transbordador del Niágara*, su realización más famosa junto con el ajedrecista. Este transbordador, construido en el año 1916, permanece aún en servicio, sin que, más de setenta años después, se haya producido ningún accidente grave.

En el dominio de la aerostática, hasta mediados del siglo pasado, la atención de los científicos e ingenieros se centraba en la calidad de los globos: sistema de ascenso, mantenimiento, maniobrabilidad, gases utilizados y tiempo de permanencia en vuelo. El problema pendiente era el de la propulsión, es decir, el tránsito del globo al dirigible. El motor de combustión interna, ideado por el ingeniero alemán Gottlieb Daimler en 1887, puede considerarse como el origen del período eficaz de los dirigibles como vehículos de navegación aérea.

Antes de —y simultáneamente a— Torres Quevedo se habían establecido dos tipos básicos de dirigibles, el rígido, de Ferdinand von Zeppelin, y el flexible, de Albert Santos-Dumont y del general Meusnier. Los zeppelin presentaban armaduras interiores rígidas que se encargaban de asegurar la rigidez de la forma del globo, cuya envoltura se construía con materiales asimismo rígidos, de metal o madera, cubierta con tela barnizada. No podía, sin embargo, plegarse el globo una vez deshinchado, ofrecía una resistencia mayor a la marcha debido al gran volumen de lo suspendido en el exterior y sufría oscilaciones transversales. Los dirigibles flexibles, que conseguían la rigidez de la forma y de la envoltura mediante exceso de presión interior respecto de la exterior, podían plegarse y transportarse, si bien poseían el grave inconveniente de que la suspensión de la barquilla tendía a doblar el globo por el centro. Unos y otros eran alargados, más o menos fusiformes, para obtener mayores velocidades y menores resistencias, y portaban una barquilla sostenida por una armadura, conjunto semejante a una viga de longitud próxima a la del dirigible.



6. EL AJEDRECISTA. **Si la memoria *Ensayos sobre Automática. Su definición. Extensión teórica de sus aplicaciones* es la obra clásica, pionera por antonomasia de la automática en su manifestación teórica, el ajedrecista constituye una obra práctica pionera indiscutida y a la que debe Torres Quevedo gran parte de su fama. Es de tipo electromecánico. Está programada, en el marco de las reglas del juego de ajedrez, para resolver, de manera determinista, cualquier final de partida de la torre y rey blancos contra rey negro. Torres construyó dos ajedrecistas: uno en 1912 y otro en 1920.**

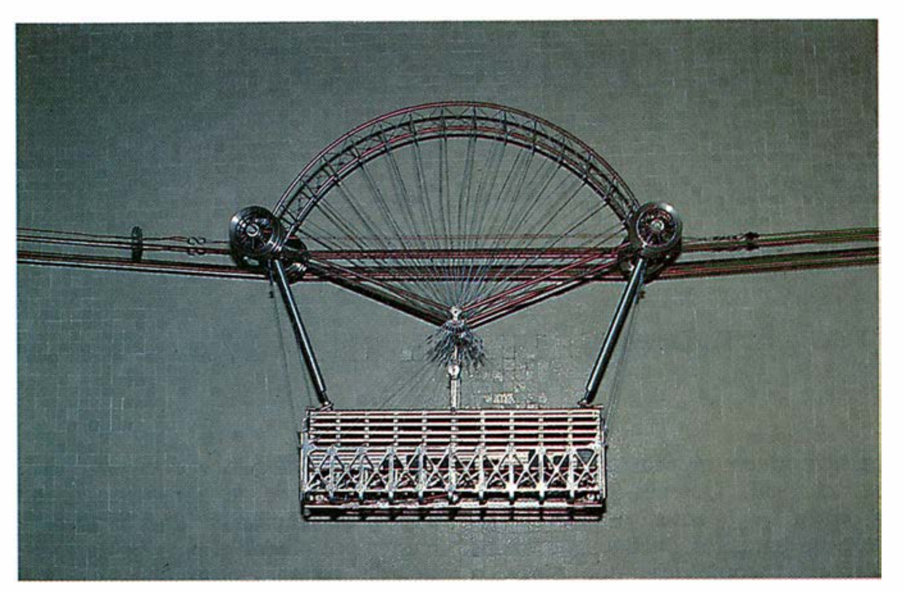


7. LOS ARITMOMETROS. Leonardo Torres Quevedo construyó varios aritmómetros electromecánicos, cuyas características principales —en su mayoría novedades en la época— son las siguientes: (*a*), mucho mayor capacidad de cálculo que todas las precedentes (como máquina sumadora puede operar con sumandos de cinco cifras hasta la suma total de 9.999.999; y como aritmómetro es capaz de sumar, restar, multiplicar y dividir con números de tres a cinco cifras según las operaciones); (*b*), puede gobernarse a distancia por medio de una máquina de escribir ordinaria dotada de contactos eléctricos en sus teclas numerales y de un dispositivo para escribir automáticamente los resultados de las operaciones transmitidas por el autómata (facultad de gobierno a distancia que permitía la centralización de una serie de calculadoras automáticas puestas al servicio de distintos departamentos); (*c*), posee memoria electromecánica mediante un inscriptor donde el autómata registra los números hasta que el usuario humano escribe el signo de la operación, y (*d*), para las diferentes operaciones está dotado de un coordinador o cerebro automático que ordena el modo de obrar según el tipo de operación. El aritmómetro se construyó en el Laboratorio de Automática, y se realizaba con él, por primera vez en el mundo para máquinas de calcular, el mando a distancia y la memoria.

Torres Quevedo centró su preocupación en el problema de la estabilidad cuando el resto aún seguía preocupado prioritariamente por el de la propulsión. En 1902, presentó sendas memorias, con principios teóricos generales de la aeronáutica y concepciones prácticas, a la Academia de Ciencias de París (*Mémoire sur l'avant-projet de ballon dirigeable à quille intérieur*) y a la Real de Ciencias de Madrid (*Memoria sobre la estabilidad de los globos*), en las que indica las causas de inestabilidad consecuentes con las posiciones y cantidades de las fuerzas presentes: peso, empuje ascensional, propulsión y resistencia del aire, que pueden originar momentos (pares de fuerzas) con tendencia a inclinar el globo o la barquilla, efectos que son tanto mayores cuanto mayor sea la velocidad.

Su aportación —gran novedad— consistió en introducir el armazón, la "viga", en el interior del globo, gracias a lo cual la barquilla podía ser pequeña y hallarse próxima a aquél. Para mantener la quilla, la viga, "en equilibrio" logra la estabilidad de forma y, sobre todo, en vuelo mediante unos pares de tirantes en forma de triángulo isósceles con vértices en los extremos inferior y superior de la viga. La estructura interior está constituida por un conjunto de barras que hacen que unos triángulos sean rígidos y que otros sean flexibles que adquieren rigidez con la presión interior del gas, permaneciendo unidos por medio de tirantes. En la parte inferior del globo, unida a la viga interior, hay un sistema rígido para sostenimiento de la barquilla.

En su juicio informativo sobre la última memoria se expresa así José Echegaray, comisionado por la Academia: "El Sr. Torres ha calculado minuciosamente todas las piezas de este sistema.../... ha calculado la transmisión teledinámica desde la barquilla a la hélice, y las presiones sobre el globo del doble cable al pasar por varias poleas y transmitir la energía propulsora del motor a la hélice.../... desde el punto de vista científico, el cálculo de la curva que afecta la tela del globo tanto en la parte cilíndrica como en las regiones de popa y proa... tiene en cuenta hasta las variaciones de presión a diferentes alturas de la tela./... el hidrógeno está limitado en sus cambios bruscos, pero no en su circulación general.../... se han dispuesto diferentes bolsas de aire para regularizar los movimientos de ascensión y descenso. /... un péndulo que, según se incline en uno u otro sentido por consecuencia de las



8. EL TRANSBORDADOR. La obra más conocida de Torres Quevedo, por su atractivo turístico y su reiterada presencia cinematográfica, es el *Transbordador del Niágara* ("Spanish aerocar"). La obra, que ganó un concurso internacional, se realizó con capital y tecnología enteramente españoles.

inclinaciones del globo, determina la inyección del aire en la parte más alta, a fin de que el globo automáticamente vuelva a recobrar la horizontal".

El proyecto de Torres Quevedo recibió el apoyo del gobierno español. En 1904 presenta otro nuevo, y se comienza en 1905 con la colaboración de Alfredo Kindelán, para un dirigible de 950 metros cúbicos. En el Parque Aerostático de Guadalajara, en 1908, se demostró la eficacia del sistema torresquevediano. La casa Astra, de París, se interesó por el modelo, y, tras los primeros ensayos, se adoptó la decisión de compra de la patente por todo el mundo, salvo España. En 1911 se construyó el primer dirigible Astra-Torres con 8000 metros cúbicos de capacidad. Dos años más tarde, lo adquiriría Inglaterra. Se superó la velocidad de 80 kilómetros por hora. En 1914 se construyó el Astra XV, sistema Torres Quevedo, de 23.000 metros cúbicos, dimensiones análogas a los zeppelin alemanes y con velocidades próximas a los 100 kilómetros por hora. En la primera guerra mundial fueron utilizados con éxito por Francia e Inglaterra.

Sus últimas aportaciones en este campo de la navegación aérea se centraron en el proyecto del dirigible *Hispania*, patentado el 18 de octubre de 1919. Se trataba de crear un transatlántico que cubriera el servicio regular entre España y América, basándose en una idea de otro impulsor de la aeronáutica española, Emilio Herrera. El principio en que se fundaba este nuevo proyecto consistía en repartir la carga (ahora se trataba de personas y de un gran volumen de combustible) según la distribución del empuje ascensional.

Una última referencia no debe olvidarse en este punto. Parece claro que el telekino fue concebido —al menos en sus inicios— con la finalidad de dirigir desde tierra el vuelo de los dirigibles evitando el pilotaje humano para garantizar la seguridad de las personas. El telekino puede considerarse como lo primigenio en automática y en mando a distancia.

Como escribió F. H. Raymond, Torres Quevedo fue quien señaló el nudo de la automática. Resulta paradójico que sus trabajos, por tantos conceptos precursores, hayan pasado inadvertidos a la mayoría de los ingenieros. Incluso a los de su propio país, podríamos añadir para vergüenza propia.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

BIOGRAFÍA DE LEONARDO TORRES QUEVEDO. Leopoldo Rodríguez Alcalde. Institución Cultural de Cantabria. CSIC. Santander, 1974.

LEONARDO TORRES QUEVEDO. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 1978.

OBRAS E INVENTOS DE TORRES QUEVEDO. José García Santesmases. Instituto de España. Madrid, 1980.

LEONARDO TORRES QUEVEDO. Francisco González de Posada. Fundación Santillana. Madrid, 1985.

PATENTES DE INVENCIÓN DE DON LEONARDO TORRES QUEVEDO. Registro de la Propiedad Industrial. Ministerio de Industria y Energía. Madrid, 1988.

Juegos de ordenador

De cómo transformar el sutil vuelo de la imaginación en flora fractal

A. K. Dewdney

"Así, observan los naturalistas,
tiene la pulga otras menores que en
ella se festejan;
y éstas aún
otras más pequeñas, que les pican y
molestan;
y así, *ad infinitum*."

—JONATHAN SWIFT,
On poetry, A Rhapsody

Así, hacen notar los matemáticos, si las pulgas fuesen todas iguales excepto en su tamaño, todos sus saltos y corcovas se reducirían a transformaciones afines. ¿Qué significa, exactamente, expresión tan altisonante? No es más que una fórmula para ampliar o contraer geométricamente un objeto, para desplazarlo, girarlo e incluso, a veces, deformarlo. Como en el caso de las pulgas, podemos aplicar reiteradamente una sola transformación afín para producir réplicas en miniatura del original. Quienes prefieran no prodigar sus talentos en la propagación de parásitos pueden aplicar las fórmulas geométricas que daremos más adelante, francamente sencillas, a la generación de imágenes tan intrincadas como los cuadros de los museos o los paisajes de la naturaleza.

Un pequeño conjunto de transformaciones afines permite engendrar obras tan abstractas como el triángulo de Sierpinski, que se muestra en la figura 2. Un grupo de transformaciones algo mayor consiente re-crear paisajes como el litoral de Monterrey, que vemos en la figura 1. En realidad, es posible reproducir una imagen cualquiera mediante una serie de transformaciones afines. El truco consiste en saber cuáles elegir. Operando en esta línea, Michael F. Barnsley, de Iterated Systems, Inc., de Norcross, Georgia, ha descubierto un procedimiento general para reducir una imagen a una serie de transformaciones afines. Su técnica ha abierto apasionantes posibilidades para la transmisión de imágenes informáticas y de televisión. Antes de que la describa, permítanseme unas palabras acerca de las transformaciones afines.

Al aplicar una transformación afín a una figura, como un triángulo o una hoja de árbol, los puntos que componen la figura son desplazados a nuevas posiciones. En el proceso, la transformación puede trasladar, ampliar o contraer, girar o estirar la figura original. Si se parte de un triángulo, una transformación afín podría contraer el triángulo y desplazarlo un poco hacia la izquierda, creando así un segundo triángulo. Si se aplica la misma transformación a este triángulo menor y desplazado, se producirá un tercer triángulo que guarda, con respecto al segundo, las mismas





1. Fotografía del litoral de Monterrey (izquierda) *y reproducción de la misma imagen a partir de unas cuantas transformaciones afines* (derecha).

relaciones de tamaño y proximidad que el segundo con respecto al primero. Podemos aplicar la transformación reiteradamente y observar cómo van los triángulos trazando una senda conducente al olvido infinitesimal.

Al aplicar a un objeto una serie infinita de transformaciones afines, la figura obtenida en el límite posee la propiedad de ser sibisemejante; esto es, cada porción del resultado tiene, amplificada, el mismo aspecto que el todo. Por tanto, una secuencia de transformaciones afines puede crear un objeto semejante a sí mismo; objetos éstos conocidos por fractales.

Para llevar de acá para allá puntos del plano, todas las transformaciones afines se sirven de una misma clase de fórmulas. El punto original puede ser definido mediante dos coordenadas, a las que llamaré x e y. El nuevo punto tiene coordenadas (x',y'). La transformación está definida entonces por las dos ecuaciones:

$$x' = ax + by + e$$
$$y' = cx + dy + f$$

Los símbolos a, b, c, d, e y f son coeficientes que determinan el carácter de la transformación afín.

¿Qué ocurriría, por ejemplo, si b fuese igual a 0,5, c fuese $-0{,}5$, y a, d, e y f fuesen cero? Las dos ecuaciones que definen la transformación afín se convertirían en

$$x' = 0{,}5\,y$$
$$y' = -0{,}5\,x$$

Para determinar su efecto sobre un punto específico, el (1,2), sea por caso, basta aplicar las fórmulas. De este modo, x' se convierte en $(0{,}5 \times 2)$, o sea 1, y, análogamente, y' pasa a ser $-0{,}5$. Al efectuar esta operación sobre un gran número de puntos de un cuadrado queda a la vista una regla general. El cuadrado entero parece haber girado 90 grados en el sentido de las agujas del reloj, y, simultáneamente, haberse contraído a la mitad de su primitivo tamaño. Si e y f fuesen ambos iguales a 1 en lugar de serlo a 0, entonces el cuadrado no sólo se vería reducido y girado, sino que habría sido desplazado una unidad hacia la derecha y hacia arriba.

Las transformaciones del tipo anterior son llamadas "contractivas", porque su efecto sobre una colección cualquiera de puntos es encoger en una misma proporción las distancias entre ellos. La transformación anterior respeta también la forma de las figuras. Las propiedades de contracción y conservación de forma constituyen peculiaridades clave de las transformaciones afines empleadas en la técnica que Barnsley llama un sistema funcional-iterativo.

La fiesta empieza cuando varias transformaciones de esta clase son aplicadas muchas veces a cualquier figura que la mente pueda imaginar. Las transformaciones, juntamente con su continuada reaplicación, constituyen un sistema funcional-iterativo. Inicialmente, podría uno pensar que la resolución de las fórmulas correspondientes a sistemas funcional-iterativos comporta una extraordinaria cantidad de cálculos aritméticos. Por ejemplo, al aplicar una secuencia de transformaciones a una figura compuesta por 1000 puntos, cada transformación tendría que operar sobre 1000 puntos por vez. Y eso supondría 8000 operaciones aritméticas.

El astuto lector se habrá percatado ya de que, para determinar el efecto de un sistema funcional iterativo sobre figuras como los triángulos, es suficiente operar sobre los tres vértices. (Para completar la figura imagen, basta unir por rectas los puntos transformados.) En este caso, la transformación sólo tendría que operar sobre tres puntos por vez; empero, no se podrían garantizar semejantes economías para figuras de contorno irregular, definido por muchos puntos.

No se desespere. Barnsley nos ha aportado una sagaz idea que permite transformar eficientemente un gran número de veces incluso una figura complicada. Para mejor comprender su idea, convendrá jugar un partido del que llamaré "tenis fractal".

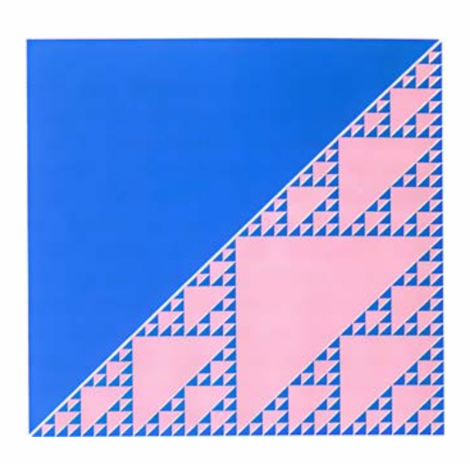
Este insólito juego de raqueta precisa de cuatro jugadores de mentalidad matemática y un juez de silla. Los jugadores Ana, Benito, Cecilia y David se encuentran listos en torno a una pista cuadrada, dividida por dos redes perpendiculares en cuatro cuadrantes cuadrados. El juez le asigna a cada jugador un cuadrante propio. Para dar comienzo a la partida, el árbitro lanza una pelota en el cuadrante de Ana y grita "Benito". Ana deja que la bola rebote sólo una vez, blande su raqueta y golpea la pelota, para que caiga en el cuadrante de Benito.

No obstante, no le es lícito a Ana dirigir la pelota a cualquier punto del cuadrante de Benito. Para lograr el tiro perfecto que prescriben las reglas, ha de juzgar primero en qué punto de su cuadrante tocó tierra la bola que le fue lanzada. Se trata de una tarea bastante simple, porque la pelota de tenis, que está empapada en tinta negra, deja una marca en el suelo de la cancha. Ana crea un mapa mental de la mancha de tinta dentro de la cancha entera. Superpone entonces el mapa sobre el cuadrante de Benito contrayendo sus dimensiones a la mitad. La posición que en el cuadrante de Benito ocupe la mancha de tinta será el punto donde habrá de entrar la bola de Ana. Si la bola hubiera caído en todo el centro de la cancha entera, el tiro de Ana habría tenido que acertar en el centro del cuadrante de Benito. En este caso, sin embargo, la bola tocó suelo dos metros al norte y seis metros al este del centro de la pista. Puesto que las dimensiones del cuadrante de Benito y de los demás son la mitad de las de la pista completa, Ana debe dirigir la bola a un punto situado 1 metro al norte y 3 metros al oeste del centro del cuadrante de Benito.

El magnífico tiro de Ana representa una transformación afín. Ha creado con él una segunda marca de tinta, que ha sido desplazada hacia el cuadrante de Benito y que se encuentra más cercana a las lindes del mismo.

Tras la devolución de Ana, el juez grita "David". Benito sale lanzado a cazar la pelota al primer bote y efectúa un tiro "perfecto" al cuadrante de David. El árbitro, quizás un poco atolondrado por el sol, empieza entonces a gritar nombres al azar. No obstante, siendo Ana, Benito, Cecilia y David calculistas consumados, logran jugar un partido perfecto. Cada jugador hace siempre impacto en el punto preciso. Al cabo de un rato, sin embargo, las marcas de tinta dejadas por la pelota de tenis crean sobre la pista una figura fractal. De hecho, las marcas acaban por ennegrecer la pista uniformemente. Es entonces cuando el árbitro decreta el final del partido.

La figura 3 muestra las primeras fases del juego. Tras el primer lanzamiento de Benito a David, el árbitro



2. El triángulo de Sierpinski.

cantó "David" por segunda vez. Ello no es problema para nadie, salvo para David, claro está, quien lanzó la bola hacia el vértice suroeste de su propio cuadrante, porque su cuadrante ocupa el ángulo suroeste en la cancha entera. Después de que la pelota rebotase en el propio cuadrante de David, el juez cantó "Cecilia", y David lanzó la bola hacia el cuadrante de ésta, según las reglas. Si el juez hubiera cantado "David" una y otra vez, David hubiera tenido que dirigir la pelota progresivamente más cerca del vértice suroeste, aunque sin nunca alcanzarlo del todo.

El tenis fractal ilustra una característica clave de los sistemas funcional-iterados. Un único punto, aplicado una y otra vez por una secuencia aleatoria de transformaciones afines, acabará por "llenar" cierta región. Son las órdenes del árbitro, esto es, las transformaciones por él indicadas, las que determinan la imagen definitiva. En la práctica, el juego termina cuando ha quedado manifiesta una densidad satisfactoria de puntos negros.

Los lectores que se pregunten por qué llamamos a este juego "tenis fractal" lo verán en toda su fuerza cuando se desarrolla sobre la hoja de un helecho de los llamados lengua de ciervo. Sigue siendo un juego a cuatro; pero, en lugar del clásico cuadrado liso de la pista de calentamiento, la cancha en helecho tiene bordes irregulares. Como ilustra la figura 4, cuando el árbitro canta "Ana", uno de los jugadores tiene que lanzar la bola al foliolo ocupado por ésta. El punto donde ha de tocar la bola depende de la posición del último rebote con relación a la hoja entera. De este modo, la orden "Ana" corresponde a una transformación afín. La orden "Benito" es otra transformación afín que envía la "pelota" al correspondiente punto del foliolo situado en el lado izquierdo de la hoja, cerca de la base. La orden "Cecilia" hace otro tanto en relación con el foliolo situado en el lado contrario de la base. Finalmente, la orden "David" envía cualquier punto de la hoja como un todo al segmento rectilíneo que representa el peciolo, en la base foliar.

Cuando se pone el punto en juego, el árbitro empieza a cantar al azar los nombres de los jugadores. El punto podría partir del centro de la hoja, saltar al centro del foliolo de Benito, desplazarse después a un punto del foliolo de Cecilia, y así sucesivamente. El juego prosigue hasta las 10.000 jugadas. Y, conforme va desarrollándose, va emergiendo la imagen delicada y orgánica de la hoja de helecho [*véase la figura 4*].

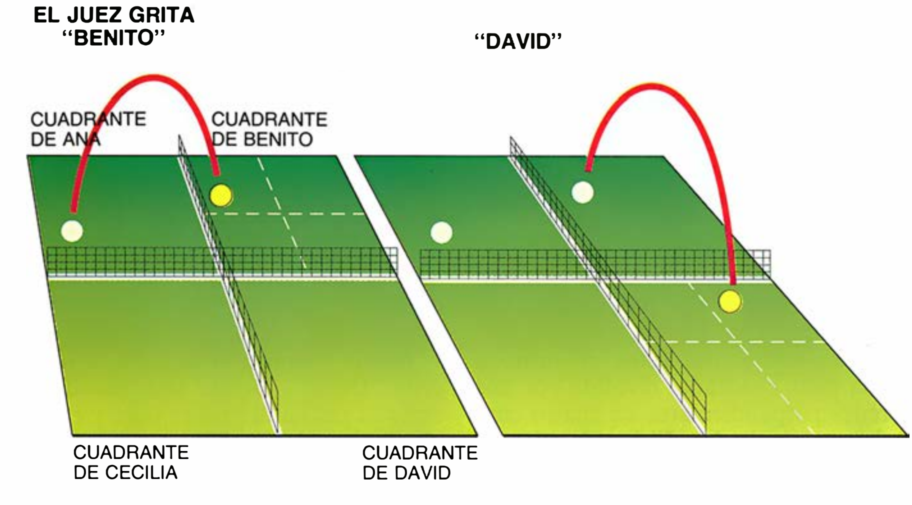
Me queda por describir un elemento más del juego. La secuencia no es del todo aleatoria: al ir cantando los 10.000 tiros, el árbitro favorece a ciertos jugadores. El caso de la lengua de ciervo proporciona un ejemplo perfecto. El foliolo de Ana es el de mayor superficie. Por consiguiente, si el árbitro cantase "Ana" con la misma frecuencia que los demás, el foliolo de Ana se iría llenando más lentamente que los de otros nombres. Para corregir esta desigualdad, el juez le concede a Ana una parte leonina de las jugadas; lo cierto es que dicho número es proporcional a la porción de área foliar total que Ana tiene asignada.

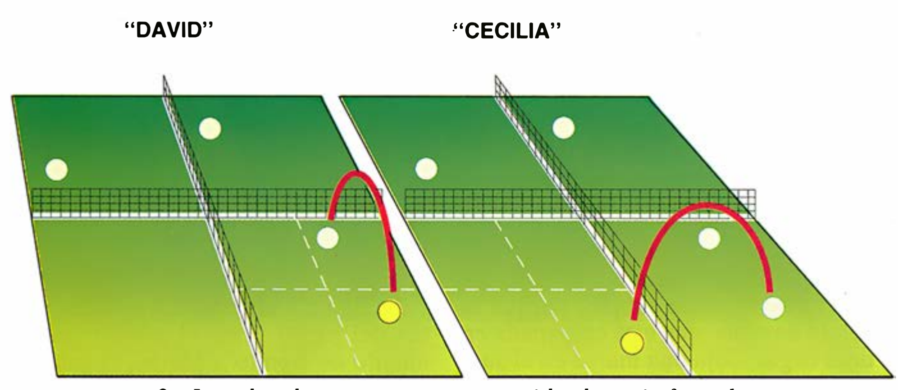
El árbitro canta "Benito" y "Cecilia" aproximadamente el mismo número de veces, siendo los números en cada caso sensiblemente proporcionales a las áreas de sus foliolos respectivos. Dado que el vástago es la figura de menor área de todas, David intervendrá muy de vez en cuando.

Los lectores se habrán percatado sin duda de que las cuatro transformaciones asociadas con la hoja de lengua de ciervo transforman el perfil básico en cuatro regiones que subdividen aproximadamente el área esbozada. Barnsley llama *collage* a esta subdivisión. Sus colegas y él han descubierto un teorema que garantiza una buena reproducción fractal. El teorema del *collage* afirma que, cuanto más exactamente sea aproximado el contorno de un fractal por un *collage* de cierto número de transformaciones afines de ese perfil, tanto más exactamente reproducirá el sistema funcional-iterado al fractal original.

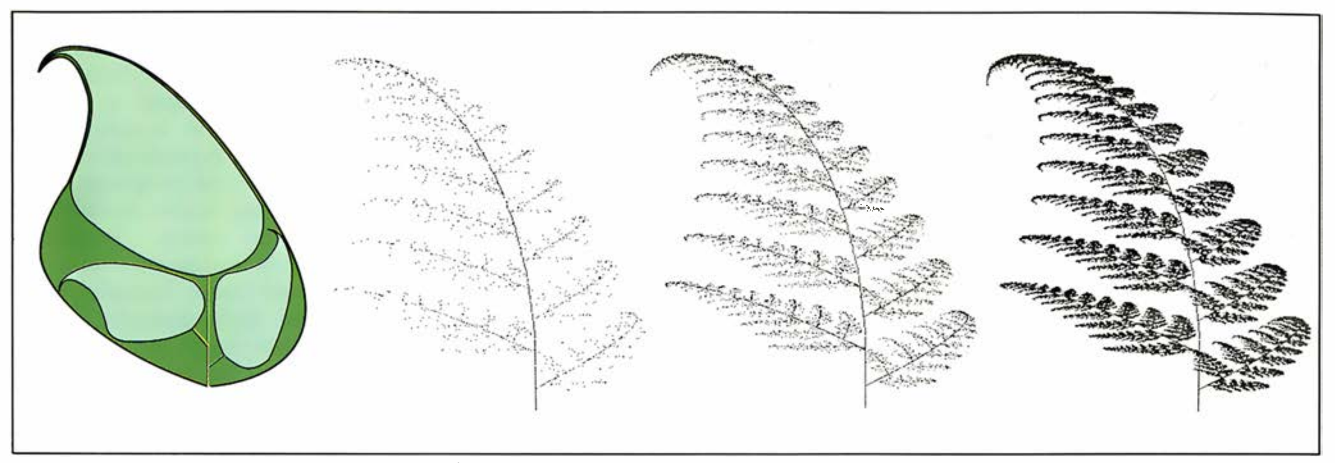
El teorema del *collage* nos conduce ahora a una bifurcación en la senda expositiva, al punto donde ésta se escinde en creación y re-creación. ¿A qué propósito dedicaremos un sistema funcional-iterado?

En teoría, cualquier fractal puede ser construido por medio de algún sistema funcional-iterado. Tomemos, por ejemplo, el triángulo de Sierpinski que se muestra en la figura 2. Se trata de un triángulo, del que se ha eliminado una zona triangular central, dejando tres triángulos más pequeños. Dada la naturaleza fractal del tema que nos ocupa, a ninguno de los





3. Jugadas de apertura en un partido de tenis fractal.



4. Un sistema funcional-iterado va rellenando la hoja de un helecho.

lectores le sorprenderá saber que, a cada uno de los triángulos, le ha sido arrebatado su propio triángulo central.

Tres son las transformaciones afines que participan en la producción del triángulo de Sierpinski. Las tres nacen del *collage* que vemos en la figura 2. En este caso, un triángulo rectángulo que tiene un hueco triangular en su centro ha sido cubierto por tres triángulos idénticos de tamaño mitad del original. Cada uno de estos tres triángulos está asociado con una transformación afín particular. Cuando se juega al tenis fractal en esta extraña superficie, el triángulo original comienza a llenarse, excepto por el agujero que hay en su centro. Cada uno de los triángulos que ocupan los vértices posee un hueco en su centro, claro está, y otro tanto sucede con los triángulos de su propios vértices. El objeto final, en la medida en que un esquema finito cualquiera puede reproducirlo, está literalmente lleno de huecos triangulares a todas las escalas de magnitud visibles.

Los lectores que tengan ordenadores a sus órdenes pueden reproducir el triángulo de Sierpinski siguiendo un algoritmo para el sistema funcional-iterado idóneo. Describiré el algoritmo a grandes rasgos. Comienza haciendo las coordenadas x e y iguales a 0. Se repiten después 10.000 veces tres operaciones principales. Primera, se elige al azar una de las transformaciones afines. Segunda, se aplica a las coordenadas actuales del punto, esto es, a (x,y), la transformación afín elegida. El resultado es un par de nuevos valores que son, por así decirlo, depositados en los símbolos x e y. Tercera, se efectúa una prueba para determinar si se han realizado 10 iteraciones.

El tercer paso garantiza que la bola ha estado en juego el tiempo suficiente como para hallarse en algún lugar de la cancha. En un esquema general como éste, no se sabe de antemano cuál es el lugar óptimo donde ha de comenzar el rebote de la bola. Por tanto, se la hace partir del origen y se supone que, después de 10 iteraciones, se ha "estabilizado" y comenzado el juego normal.

Este algoritmo funcionará para cualquier sistema funcional-iterado, si se añade una característica adicional. Dado que la frecuencia con que sea elegida una de las transformaciones afines a utilizar depende del área que deba cubrir, el algoritmo tiene que irlas seleccionando con cierta probabilidad.

¿Cuáles son las fórmulas correspondientes a las transformaciones afines que producen el triángulo de Sierpinski? Describí al comienzo de este artículo el tipo de fórmulas necesarias, y mencioné que son los seis coeficientes los que determinan el carácter de la transformación. Se dan a continuación los coeficientes que originan el triángulo de Sierpinski.

	a	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*
(1)	0,5	0	0	0,5	0	0
(2)	0,5	0	0	0,5	0	1
(3)	0,5	0	0	0,5	0,5	0,5

Cada fila de la tabla representa una de las tres transformaciones necesarias.

Casi salta a la vista qué función realiza cada una de estas transformaciones. Las tres tienen, por efecto primario, la contracción de cualquier figura geométrica a un tamaño mitad; pero la transformación número 1 también acerca la figura hacia el origen, mientras que las transformaciones 2 y 3 desplazan, respectivamente, a la figura contraída una unidad hacia la derecha y medias unidades hacia arriba y la derecha. El triángulo original queda así transformado en tres triángulos más pequeños, y los pequeños, transformados a su vez en otros más diminutos.

Partiendo de estos sencillos ingredientes, incluso los lectores de moderada experiencia en programación deberían poder reconstruir el triángulo de Sierpinski en las pantallas de sus monitores. Otros quizá tengan que consultar una receta más explícita, ahora disponible en *Algorithm: The Personal Programming Newsletter*. Con mucho gusto enviaré un ejemplar gratuito de la receta a los lectores que no se hayan suscrito ya a dicha publicación.

Hasta este momento he estado refiriéndome a la creación de formas. La re-creación no resulta tan recreativa; es, empero, la principal aplicación de los sistemas funcional-iterados. Gracias a Barnsley y sus colegas, resulta hoy posible convertir cualquier escena en un sistema funcional-iterado.

De ordinario se precisan miles de bits de información para almacenar la imagen de una escena natural en un fichero de ordenador. Por ejemplo, una imagen podría consistir en una malla de 300 por 300 píxeles (elementos de imagen), cada uno de los cuales precisa de varios bits para especificar el nivel de gris o el color de ese punto. El almacenamiento normal, píxel a píxel, podría requerir un millón de bits o más. Se pueden aplicar técnicas de compresión a tales datos pictóricos para almacenar la misma información en menos espacio, pero los sistemas funcional-iterados prometen factores de compresión de 500 a 1, o quizá más. La clave: almacenar el sistema funcional-iterativo en vez de la ima-

gen que produce. Una ojeada al litoral de Monterrey (figura 1) nos permite comparar la veracidad de la imagen codificada (a la derecha) con la fotografía original (a la izquierda).

El método comienza con una imagen digitalizada en un ordenador, tomada directamente de una fotografía o cámara de vídeo. La imagen se analiza y descompone en retazos conexos, grandes y pequeños, en los cuales el nivel de gris (o el color) es relativamente constante. Las piezas de este *collage* pasan a ser la base de un examen a través de una gran biblioteca de transformaciones afines normalizadas que aplican unas piezas en otras. Si ocurriera, por ejemplo, que una de las transformaciones aplicase una gotita de rocío en una multitud de otras gotitas, dicha transformación constituiría una valiosa adición al sistema funcional-iterado que se está construyendo. En ciertos ordenadores resulta posible crear imágenes reales a la frecuencia de televisión, es decir, de 30 o más cuadros por segundo.

El potencial comercial del descubrimiento impresionó de tal modo a Alan D. Sloan, matemático que perteneció al Instituto de Tecnología de Georgia y que es hoy íntimo colaborador de Barnsley, que ambos investigadores fundaron una compañía, Iterated Systems. Entre los productos que en la actualidad ofrece la empresa se cuenta un modem capaz de transmitir imágenes, provisto de un sistema funcional-iterado que transmite una imagen de 512 por 512 píxeles en menos de 3 segundos. En el receptor, las imágenes pueden reconstruirse a velocidad de vídeo. Barnsley considera que la transmisión telefónica de imágenes de vídeo a todo color es una posibilidad nada utópica. La misma tecnología podría aplicarse también al reconocimiento automático de configuraciones y a otros proyectos que hoy por hoy son todavía poco más que un destello fractal en el ojo de Barnsley.

La "computadora Mecano" que juega al tres en raya suscitó cierto número de penetrantes análisis. Por ejemplo, Richard Arend trató de reproducir el razonamiento que llevó al equipo de antiguos alumnos del Instituto de Tecnología de Massachusetts a utilizar una matriz de memoria de 48 husillos. Insatisfecho ante el papel pasivo desempeñado por la máquina en los casos en que el humano no llega a aprovechar la posibilidad de ganar, Arend añadió un conjunto cuidadosamente minimizado de 12 husillos de memoria, que impulsan el juego hacia una victoriosa conclusión.

Aunque yo había mencionado en el artículo que el número de husillos era de 48, Charles Kluepfel se fijó en que, en la ilustración, la máquina solamente tenía 47. A pesar de ello, tradujo los husillos a un programa de ordenador, el cual, según descubrió al poco, tenía un lapsus. ¿Residía el problema en la ilustración o en la máquina original? Según Kluepfel, cuando se alcanza cierta posición, la computadora tatetí puede tratar de situar un 0 sobre un 0, en vez de hacerlo en una casilla vacía.

No faltaron lectores que tuvieran dificultades con el programa HOYO EN UNO del mes de enero pasado; la causa se debió a pequeños errores en el listado. Si todavía hay alguien atascado, se le aconseja que cambie la línea 10 de CLS a SCREEN 1 y que no olvide poner los asteriscos de multiplicación en las líneas 160 y 170.

La ampliación más interesante de nuestro inocente juego de golf se debió a Theodore C. Yapo, uno de nuestros lectores de siempre, que está a punto de terminar su carrera de ingeniería física. No contento con nuestro "green" euclídeo, Yapo preparó un programa que le permite al usuario definir prácticamente cualquier superficie curva. Visto desde arriba, el juego es delicado. "Una de las características más interesantes que he tenido ocasión de explorar resulta de las funciones asintóticas... Estos pozos infinitamente profundos funcionan a modo de agujeros negros en el campo de golf." En la actualidad, Yapo está construyendo un circuito de golf microminiatura en las laderas del monte Mandelbrot, una superficie en la que las alturas suplantan los colores.

En el artículo de marzo, se mencionaba "la pecera fantasma", un autómata celular ideado por David Silverman. Tales autómatas son con frecuencia capaces de efectuar las mismas operaciones que un ordenador; una de las funciones más delicadas es casi siempre la invención de células de memoria. En el artículo se exponía una solución en 13 ciclos de reloj. J. A. Blanco Montagut, de Madrid, ha hecho saber a INVESTIGACIÓN Y CIENCIA de una solución en seis, ideada por él.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE FRACTAL GEOMETRY OF NATURE. Benoit B. Mandelbrot. W. H. Freeman and Co., 1983.

FRACTALS EVERYWHERE. Michael Barnsley. Academic Press, Inc., 1988.

Juegos matemáticos

Pavimentos y teselaciones

Ian Stewart

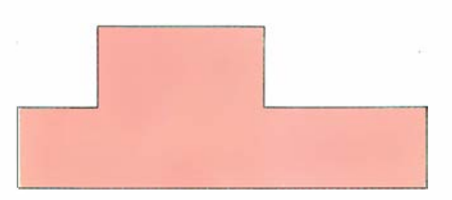
Archibald, de profesión lombriz de tierra, y su esposa Maud habían sobrevivido al traumatismo de la mudanza a su nueva tunelización de galerías unifamiliares adosadas, provista de todas las comodidades modernas, sin faltar alarma antipájaros. Ya más tranquilos, se disponían a apreciar las ventajas de su nueva morada. Maud, empero, no estaba satisfecha del todo con el estado del cuarto de baño.

"¡Archibald! ¡Archibald!"

Archibald se extrajo de mala gana de su estudio.

"¿Qué pasa, amor mío?"

—Archibald, ¿no se había comprometido el contratista a alicatar hasta el techo el cuarto de baño?



1. Uno de los azulejos del cuarto de baño de Maud y Archibald. ¿Podría el lector pavimentar un rectángulo con losetas como ésta?

—Pues, claro, mi vida.

—¡Bueno, pues de eso nada! La pared está en blanco y la caja de azulejos, despanzurrada junto a la bañera y muerta de asco.

—Voy a telefonear enseguida al constructor", dijo Archibald, con resignación.

El contratista acabó por responder, después de muchas llamadas.

"Sí, señor. Sin duda alguna, señor. Lo que pasa es que hay una pega. Los azulejos que encargó su esposa, los de 'fantasía'... sí, esos de forma tan rara, sí... bueno, no se ajustan bien.

—Imposible.

—Oscar Lange, el alicatador, dice que siempre quedan huecos."

Archibald dio golpecitos de contrariedad con la cola.

"¡Esto es absurdo! ¡En toda mi vida he oído una excusa más tonta!

—Puede ser, señor, pero ese es el problema que tenemos.

—¿Y por qué no ensambla unos cuantos, formando un rectángulo con ellos, y recubre después el muro con los rectángulos?

—Oscar Lange ya lo intentó, pero no consiguió formar un rectángulo. Además, señor, tenga usted en cuenta que formar rectángulos no es la única manera de teselar un muro."

Archibald estaba obsesionado con la idea de una teselación por rectangulación, y se expresó categóricamente.

"Bobadas.

—Bueno, le enviaré a Oscar Lange para que vuelva a intentarlo, dijo el constructor, en tono de disculpa. Vamos a ver... ¿le irá bien... el martes, de hoy en quince días?

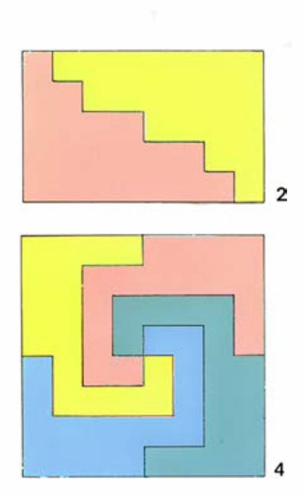
—¡Es demasiado!, exclamó Archibald. ¡Lo haré yo mismo!"

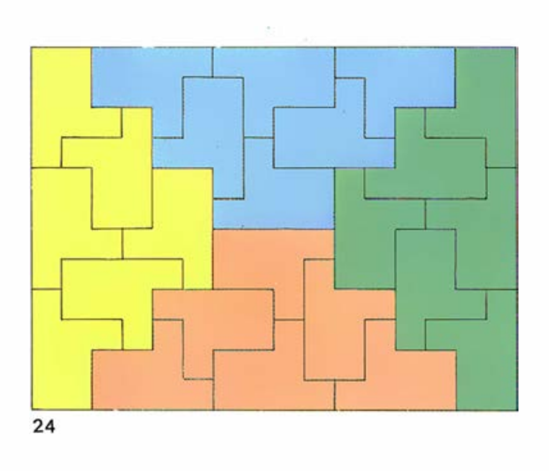
Colgó el teléfono de un golpe, y de haber tenido pies, habría montado una pataleta. Retornó pesadamente al cuarto de baño, expresó en voz alta ciertas consideraciones generales sobre la competencia del gremio de la construcción y, por fin, examinó algunos azulejos.

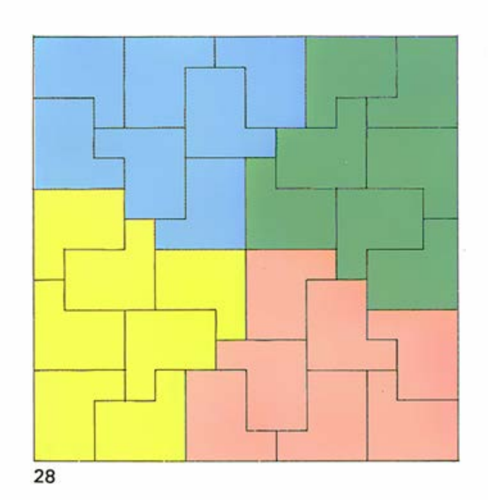
"No son de forma corriente, hubo de admitir [*véase la figura 1*]. Pero tampoco son lo que se dice complicados. ¿Cómo podría yo asociarlos para que formasen un rectángulo? Tiene que ser fácil..."

Pasaron dos días: la exasperación de Archibald iba en aumento. Pidió entonces consejo a un experto, su amigo Albert Vermenstein, que trabajaba en el registro de patentes.

"Interesante", dijo Vermenstein tras considerable reflexión. "Me he







2. Poliominós de órdenes 2, 4, 24 y 28.

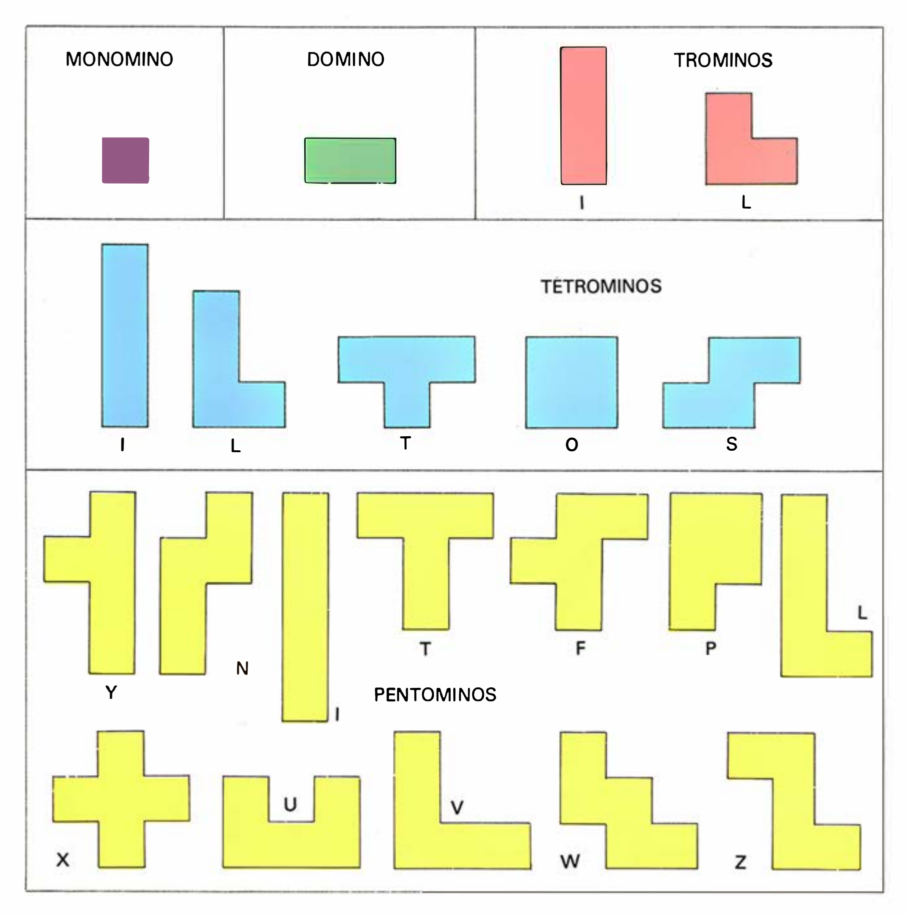
Recuadro 1: El número de n-ominós

P(n) es el número de *n*-ominós diferentes (las copias obtenidas por giro o simetría no se consideran distintas).

Q(n) es el número de *n*-ominós diferentes (las copias obtenidas por giro o simetría sí se consideran distintas).

n	*P(n)*	*Q(n)*
1	1	1
2	1	2
3	2	6
4	5	19
5	12	63
6	35	216
7	108	760
8	369	2725
9	1285	9910
10	4655	36446
11	17073	135268
12	63600	505861
13	238591	1903890
14	901971	7204874
15	3426576	27394666
16	13079255	104592937
17	50107911	400795860
18	192622052	1540820542

David Klarner, John Conway y Richard Guy han demostrado que, para valores grandes de *n*, *P(n)* es aproximadamente igual a *Q(n)*/8 y que *Q(n)* es aproximadamente igual a a^n, con $3,72 < a < 4,5$.



3. *La colección completa de* n*-ominós para* n *menor o igual que 5.*

fijado en que cada loseta tiene forma de *poliominó*, o sea, que es una figura plana obtenida por reunión de cuadrados iguales, adosados de manera que coincidan sus vértices. Cuando el número de cuadrados que la componen es *n*, se dice que es un *n-ominó*. El número de diferentes *n*-ominós crece rápidamente con *n* [*véase la tabla 1*]. El término pentominó, correspondiente al 5-ominó, es marca registrada del gran especialista Solomon Golomb.

"David Klarner ha formulado con mayor precisión los datos del problema, prosiguió diciendo Vermenstein. En 1969, Klarner definió como orden de un poliominó cualquiera el mínimo número de copias de sí mismo que permiten, adosándolas, rellenar un rectángulo (supuesto posible). En el caso de que no exista un tal número mínimo, el orden no está definido."

¿Sabría el lector idear un poliominó que carezca de orden, esto es, con el que resulte imposible pavimentar un rectángulo?

¡El rectángulo puede ser tan grande como sea necesario, con tal de que sea rectangular! Vemos en la figura 2 algunos ejemplos de poliominós de diversos órdenes. Para demostrar que el orden de un poliominó es *m*, hemos de hacer dos cosas:

(*a*) Encontrar una manera de pavimentar un rectángulo con *m* copias.

(*b*) Demostrar que tal pavimentación es imposible para todo entero menor que *m*.

¿Le parece al lector que será la primera parte la más difícil? Pues bien, de ordinario, es la segunda parte, la cuestión (*b*) la más difícil. Cualesquiera que sean el tamaño y dimensiones del rectángulo y el poliominó dado, resulta posible, al menos en teoría, decidir si el poliominó puede teselar el rectángulo; sin embargo, el único método constructivo conocido consiste en un tanteo inteligente; método, por otra parte, que rápidamente se torna impracticable incluso para rectángulos de dimensiones moderadas. No se conoce ningún método general, y son muchísimos los problemas pendientes de solución.

"Dicho esto, prosiguió Albert, la forma de sus azulejos es de una sencillez decepcionante, que es la de un heptominó, esto es, un poliominó formado por siete cuadrados. Queremos saber si esta figura tiene orden y, de ser así, cuál es. Pero me parece a mí demasiado ambicioso empezar por los heptominós, Archibald. Vamos a examinar primero los monominós, los dominós, trominós, tetrominós y pentominós."

En la figura 3 se muestran todos los n-*ominós correspondientes a* n = *1, 2, 3, 4, 5. ¿Podrá el lector determinar el orden de cada uno? El caso del pentominó* Y *es un poco delicado, pero resoluble.*

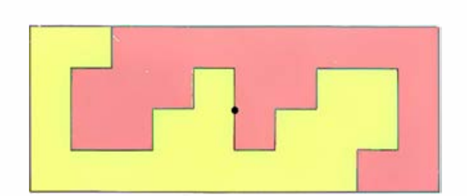
"¡Ajá! Incluso a golpe de vista se pueden observar ya algunos principios generales, dijo Albert. Como es obvio, un poliominó es de orden 1 si y solamente si es un rectángulo.

—Si eso es todo lo que eres capaz de hacer, Albert, me parece que me voy a volver a casa para dedicarme a actividades más apasionantes: por ejemplo, ver cómo crecen los cactus.

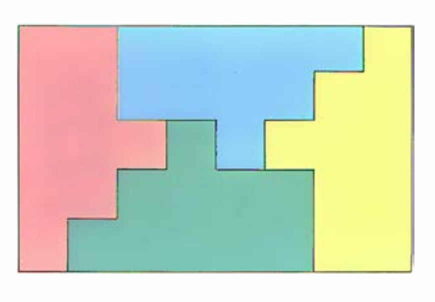
—No era más que una simple observación preliminar, repuso Albert, molesto. E incluso el hecho más trivial puede resultar útil; hay que progresar sin brusquedades. Un poliominó de orden 2 se obtiene, por definición, recortando un rectángulo en dos poliominós idénticos. Para lograrlo, el contorno del recorte ha de ser simétrico respecto al centro del rectángulo [*véase la figura 4*]. Tenemos aquí una caracterización de todos los poliominós de orden 2, tanto más útil si se tiene en cuenta que la mayoría de los ejemplos conocidos de poliominós de orden finito son poliominós de orden 2.

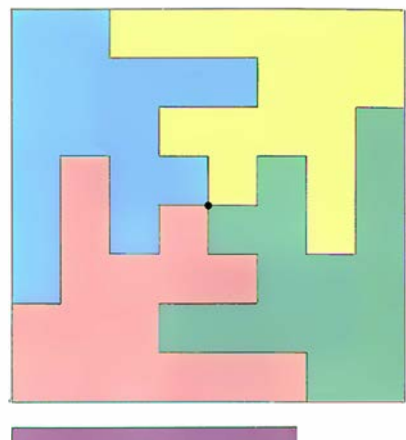
"El orden 3 es mucho más complicado. David Klarner conjeturó en 1969 que no existían poliominós de orden 3, añadiendo que 'esta idea es intuitivamente clara, aunque parece difícil establecer una demostración rigurosa'. Que yo tenga noticia, nadie ha publicado ninguna todavía. Pero David Klarner estaba en lo cierto, afirmó Albert Vermenstein: yo mismo he descubierto hace poco una demostración."

¿Sabrá el lector demostrar la conjetura de Klarner? La demostración de Albert es demasiado complicada para poder exponerla aquí; hace amplio uso de las simetrías. Corre el rumor de que Albert va a tratar de publicarla, verosímilmente bajo el pseudónimo



4. Un método general de construcción de poliominós de orden 2 es la descomposición de un rectángulo de lados "enteros" mediante un contorno (trazado sobre el cuadriculado) que sea simétrico respecto al centro del rectángulo.

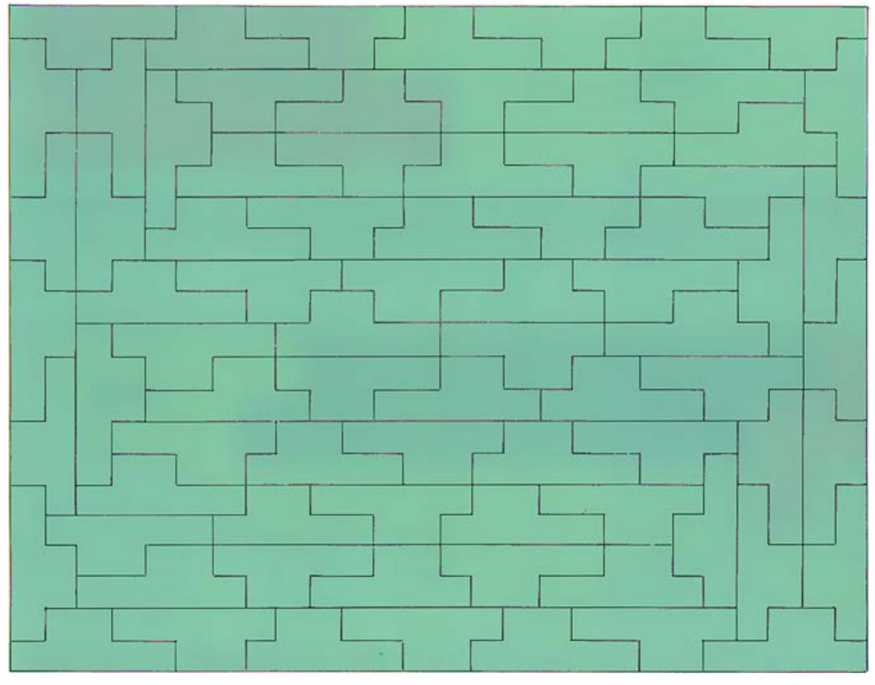




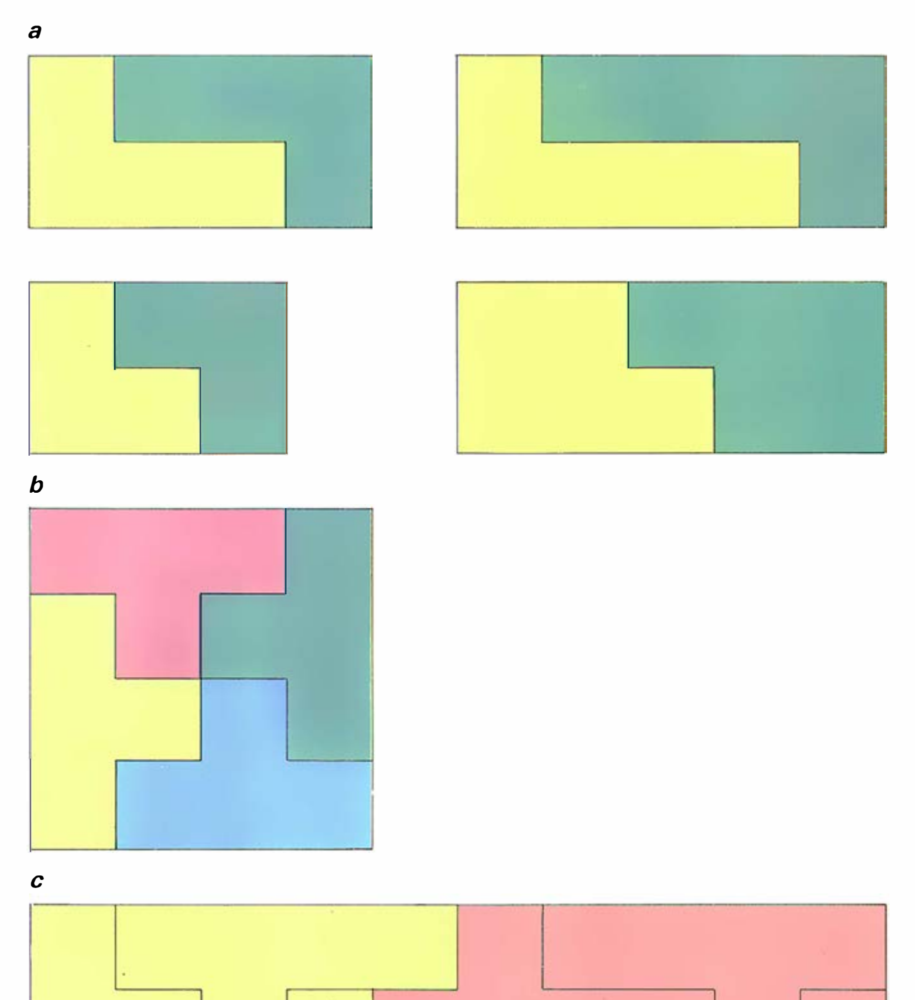
5. Dos formas de obtener poliominós de orden 4.

6. El poliominó de orden 8 descubierto por Solomon Golomb.

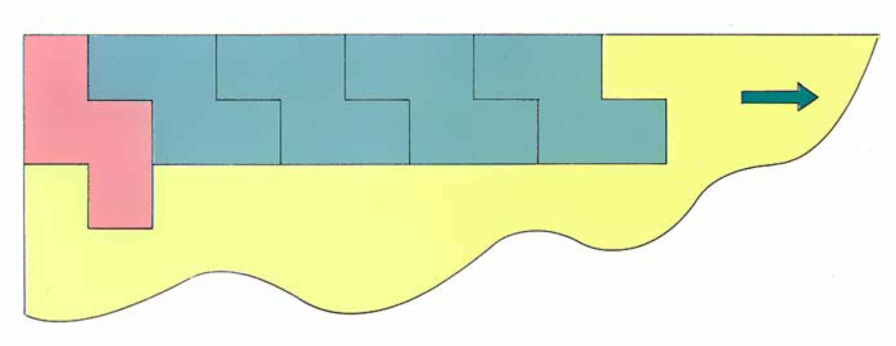
7. (a) *Un hexominó de orden 18.* (b) *El hexominó* Y, *cuyo orden fue desconocido hasta 1989.*



8. Solución al problema de Archibald. Pavimentación de un rectángulo por medio de 76 de sus azulejos.



9. (a) n*-ominós de orden 2, para* n *menor o igual que 5.* (b) *El tetrominó en* T *es de orden 4.* (c) *El pentominó* Y *es de orden 10.*



10. Con tetrominós en S *es imposible pavimentar un rectángulo. La pieza roja ha de ocupar un ángulo; entonces las posiciones de las sucesivas piezas verdes son obligadas; no pueden recubrir la otra esquina del lado verde.*

del autor de este artículo. En tal caso, nos hallaríamos ante la primera conjetura matemática demostrada por un gusano.

"¿Qué se puede decir del orden 4?", preguntó Archibald, que empezaba a entrar en el juego. Saltaba a la vista que no pensaba dejar en paz a Albert en tanto no hubiera resuelto el problema del cuarto de baño de Maud. Pero Albert no parecía tener prisa. No, de ninguna manera.

Sobre todo si éste ignoraba la respuesta, ¡una triste eventualidad!

"Se conjetura que no existen más que dos tipos de poliominós de orden 4, dijo Albert [*véase la figura 5*]. Aunque es verosímil que una demostración resulte complicada –por mi parte no he encontrado ninguna– no parece inalcanzable para una persona cuidadosa y sistemática.

–¿Y el orden 5?

–No se conoce ningún ejemplo de poliominó de orden 5. Hasta ahora, los únicos órdenes superiores a 4 que se conocen son 10, 18, 24, 28, 76 y 92.

–Son números bien curiosos, dijo Archibald.

–Sin duda, aprobó Albert. De ser los únicos posibles, el 92 sería muy notable, pues sería el máximo número poliominal posible.

–Humm. ¿No tendrá el 92 alguna otra propiedad curiosa?"

Vermenstein comentó que François le Lionnais no mencionaba ninguna propiedad notoria del 92 en su libro *Les nombres remarquables* (Hermann, 1983).

"Tal vez no tenga nada de curioso ni de interesante, dijo Archibald.

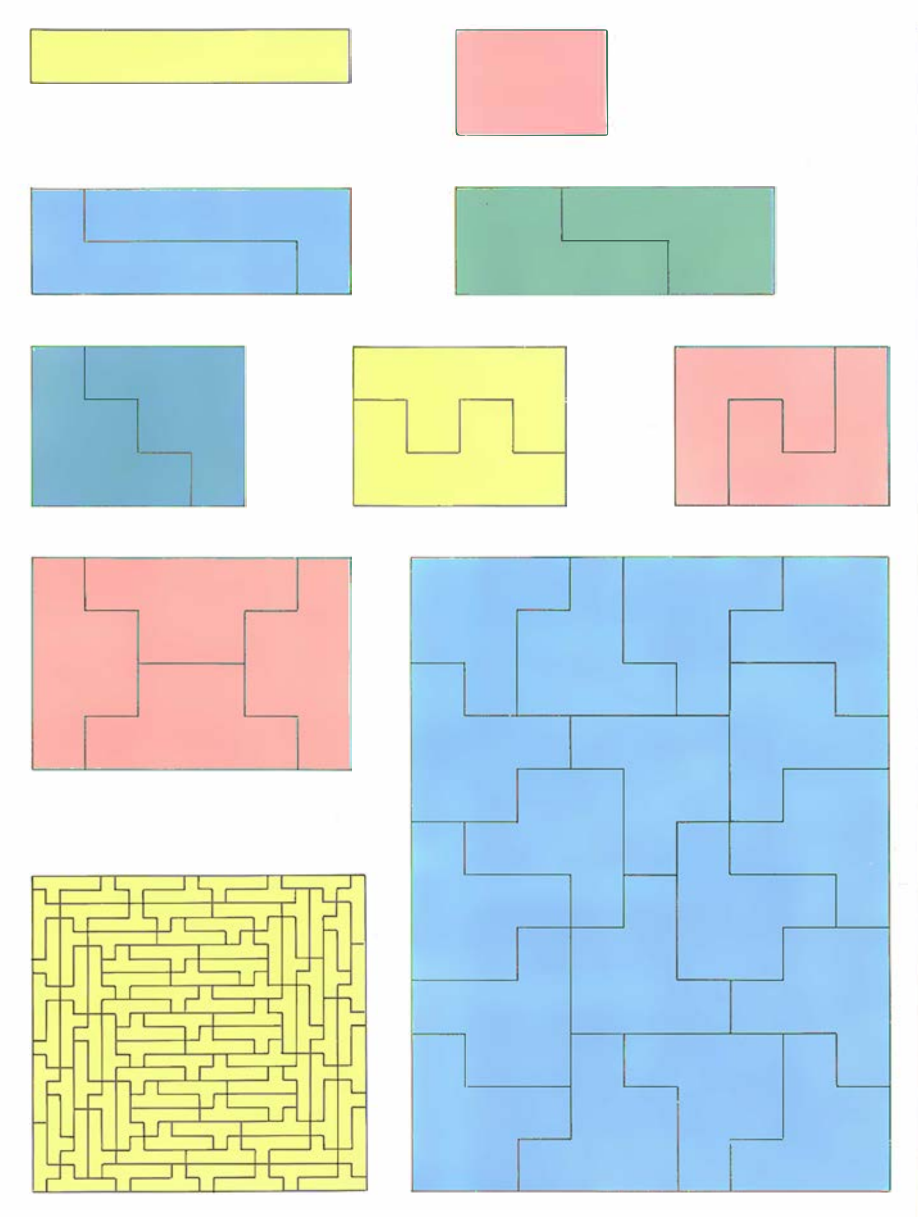
–Los lógicos tienen a este respecto una broma clásica, contestó Albert. Uno de sus teoremas afirma que todo número natural es interesante. He aquí la demostración: de haber números sin interés, existirá entre ellos uno que sea el mínimo de los no interesantes. Ahora, ¡tal número sí tendría una propiedad interesante! Surge una contradicción lógica, lo que implica que la hipótesis de existencia de números carentes de interés es falsa.

–Ya veo, dijo Archibald; pero, ¿es igualmente curioso?

–No lo sé, respondió Vermenstein. La cuestión es bien curiosa, desde luego. Quizá la respuesta sea negativa, pues Solomon Golomb demostró en 1989 que todo múltiplo de 4 podía ser un orden [*en la figura 6 se representa un poliominó de orden 8*].

–¿Y de mi cuarto de baño, qué?, quiso saber Archibald.

–Se trata de heptominós. Espera un poco; no hemos examinado aún los hexominós, replicó Vermenstein.



11. Los hexominós de orden finito.

Existen exactamente 35 hexominós, y sabemos que solamente diez de ellos pueden pavimentar un rectángulo, o sea, tienen orden. Te daré algunas indicaciones para que pruebes de encontrarlos. Hay dos de orden 1, cinco de orden 2 y uno de orden 4. El poliominó de la figura 7*a* es de orden 18: puedes recortar 18 copias y tratar de acoplarlos en un rectángulo de 9 × 12. Hasta hace muy poco, quedaba por resolver únicamente un caso: el hexominó *Y* [*figura 7b*]; pero en 1989, Karl Dahlke demostró que era de orden 92. Había prometido decirte más, y he cumplido mi promesa."

¿Podrá el lector descubrir los ocho hexominós de orden menor o igual que 4? ¿Sabrá pavimentar un rectángulo con el poliominó de la figura 7a? Uno puede tratar de pavimentar un rectángulo de 23 × 24 con 92 pentominós Y*, pero conviene saber que a K. Dahlke la tarea le llevó tres días con sus noches en un micro-ordenador programado en el lenguaje C. Quien desee evitarse ese trabajo tiene indicada la solución en la figura 11.*

"¡Fantástico, Albert! Pero, ¿y mi cuarto de baño...?

—Ahí es donde tu problema pasa a ser apasionante. Hasta hace muy poco tan sólo se conocía un heptominó de orden mayor que 2. Los demás, salvo por una excepción, eran el rectángulo 1 × 7 o estaban dados por las construcciones que he indicado ya para el orden 2, o carecían de orden. El único heptominó de orden elevado fue descubierto por James Stuart, de Endwell, Nueva York, y es de orden 28 [*está representado en la figura 2*].

—¡Ah! ¿Y ésa es la loseta de nuestro cuarto de baño?

—¡Desde luego que no! No, tu loseta resulta ser la excepción cuyo orden seguía siendo desconocido..."

Archibald profirió una exclamación escasamente verme-nacular.

" ...hasta prácticamente ayer, prosiguió Albert. Y es de nuevo K. Dahlke quien viene a socorrernos. También en 1989, modificó su programa para hexominós *Y* con el fin de aplicarlo a tu heptominó, demostrando de esta forma que su orden es exactamente 76 [*véase la figura 8*].

Archibald dio a su amigo las gracias más calurosas y se apresuró a retornar a su bungalería para informar a Maud. Va a quedar tremendamente impresionada, pensaba él. Al llegar se la encontró en la cocina, preparando una sopa...

"¡Maud! ¡No hay problema! ¡Lo del alicatado está tirado! ¡Lo único que hay que hacer es tomar 76 losetas y formar un rectángulo con ellas!

—¡Archibald, a veces te superas a ti mismo! ¡Qué noticia más formidable! Empecemos ahora mismo. Ve contando 76 losetas mientras yo limpio las paredes a fondo."

Con una ondulación majestuosa, Maud salió de la cocina y bajó por el pasillo hacia el cuarto de baño, seguida por Archibald.

Mientras su esposa fregaba vigorosamente los muros, Archibald alzó la caja de losetas. "Es casi seguro que la etiqueta dirá cuántas piezas contiene. Ganaré tiempo si sólo saco las necesarias", pensó. Le dio la vuelta al envase de cartón para leer la etiqueta.

CERAMINOSA
AZULEJOS
HEPTOMINALES
75 PIEZAS

Archibald se volvió hacia su esposa.

"Maud, amor de mi vida, tenemos un pequeño problema..."

Soluciones

1. Quizás el ejemplo más sencillo de poliominó incapaz de pavimentar un rectángulo (y carente de orden, por tanto) sea el octominó en forma de cuadrado de 3 × 3 desprovisto de la loseta central, pues no hay posibilidad de "taponar el agujero".

Recuadro 2
ORDEN DE LOS N-OMINOS PARA N MENOR QUE 5

TAMAÑO	TIPO	ORDEN
MONOMINO		1
DOMINO		1
TROMINOS	*I*	1
	L	2
TETROMINOS	*I,O*	1
	L	2
	T	4
	S	ND
PENTOMINOS	*I*	1
	L,P	2
	Y	10
	F,N,T,U	ND
	V,W,X,Z	ND

ND: NO DETERMINADO

2. Los monominós y los dominós son rectángulos y, por consiguiente, figuras de orden 1. Otro tanto vale para el trominó *I*, el tetrominó *I*, el tetrominó *O* y el pentominó *I*.

La figura 9*a* muestra que el trominó en *L*, el tetrominó *L*, el pentominó *L* y el pentominó *P* son de orden 2.

El tetrominó *Y* es de orden 4 [*véase la figura 9b*]

El pentominó *Y* es de orden 10 [*véase la figura 9c*]

Los casos restantes —el tetrominó *S* y los pentominós *T*, *F*, *N*, *X*, *U*, *V*, *W* y *Z*– no pueden teselar rectángulos. La demostración de imposibilidad resulta en cada caso de examinar lo que le ocurriría a uno de los vértices de un hipotético rectángulo pavimentado por cada uno de ellos: la disposición de las demás piezas queda entonces determinada y deja una parte no recubierta en un vértice adyacente. La figura 10 se ocupa del caso del tetrominó *S*. La demostración de los casos restantes la obtendrá el lector de forma análoga.

Se da un resumen de los resultados en la tabla 2.

3. En la figura 11 se muestran los diez hexominós de orden finito. El esquema de la parte inferior izquierda es la solución de K. Dahlke para el hexominó *Y*.

Libros

Filopón, matemáticas, conodontos y botánica

Luis Alonso, Javier de Lorenzo, Susana García-López y Angel Romo

JOHN PHILOPONUS'S CRITICISM OF ARISTOTLE'S THEORY OF AETHER, por Christian Wildberg. Walter de Gruyter; Berlín, 1988.

Alejandría encierra, para el historiador de la ciencia, el atractivo de lo conocido a medias mezclado con la seguridad cierta de que hubo allí una fecunda riqueza de ideas. La templanza del clima, el ser puerta del misterioso Egipto y extremo de la cultura greco-romana, amasijo de razas y creencias, fermentado todo ello en una dilatada prosperidad mercantil, creó una sociedad ilustrada amiga de la tolerancia y el escepticismo. Lo que no impidió episodios de violencia física y dureza dialéctica. Quizás el haber anidado una poderosa tradición teológica –con Clemente y Orígenes, entre otros–, de ortodoxos y heresiarcas de distinto cuño, ha refrenado muchos intentos de acercarse al contenido cosmológico o biológico *tout court* de los textos alejandrinos.

Las cosas están cambiando. Y ahí está, por ejemplo, la obra reciente de R. Sorabji *Philoponus and the Rejection of Aristotelian Science*, o la traducción al inglés del libro del alejandrino *Contra la eternidad del mundo defendida por Aristóteles* realizada por Christian Wildberg, o la monografía del mismo que da pie a esta reseña. No es aventurado afirmar que Wildberg no hubiera elaborado este encomiado estudio de haber padecido los escrúpulos sectarios que paralizan muchos empeños nuestros. Al hilo de la defensa apologética de la creación del mundo, Filopón hilvana una teoría física unificadora que destruía la división aristotélica entre mundo sublunar, dominado por los cuatro elementos, y el mundo supralunar del reino del éter. La física le debe también a Filopón la teoría del *impetus* (fuerza impresa por un agente a un objeto que le permite permanecer en movimiento mientras no encuentre resistencia de sentido opuesto), hipótesis cuyo estudio tiene una sólida bibliografía desde los trabajos de Anneliese Maier. De Filopón es también la teoría de la materia como substrato tridimensional indeterminado y su crítica de las leyes aristotélicas de la caída de los graves (que no debe confundirse, empero, con la crítica galileana a propósito de la velocidad de la caída).

No sabemos, empero, cómo se desarrolló su vida. Nació en las postrimerías del siglo v; amante del trabajo (eso significa "Filopón"), gastó sus años dedicado al estudio y la enseñanza; discípulo de Ammonio, aprendió de éste el dominio de la lógica que aplica con especial finura en su descomposición de la argumentación aristotélica sobre los movimientos naturales de cada elemento. Comentó la filosofía natural del estagirita y, en la onda que quizá con excesivo simplismo se aplica a la escuela alejandrina, fue haciéndose cada vez más amigo de Platón.

Wildberg estructura su obra en dos partes o secciones. Inicia la primera con un sumario repaso al concepto de éter en el pensamiento griego prearistotélico, por lo común relacionado con el azul del cielo, o incluso con la sede de Zeus, para abordar en seguida el soporte físico-matemático de esa quintaesencia, su simplicidad, jerarquía ante los demás elementos, naturaleza y movimiento perfecto. El lector hubiera deseado no ver limitada la referencia del texto –el *De coelo*– a las siglas del punto aludido, sino disponer del párrafo completo. (El texto en cuestión no abarca más de cuatro páginas de la traducción de J. L. Stocks, de la edición princetoniana de Jonathan Barnes.)

En la segunda parte, Filopón replica, punto por punto, la exposición aristotélica. Wildberg agrega un excursus sobre cómo entender el substrato material tridimensional; al final de cada punto resume, desprovisto de aparato crítico, lo analizado, resumen que le sirve para incluir sus propias apreciaciones. Resúmenes que vertebra en el último capítulo de la obra y donde, distanciado de los textos clásicos, nos ofrece un ensayo ponderado de la cosmología aristotélica, platónica y cristiana. (L. A.)

EN HONOR DEL ESPÍRITU HUMANO. LAS MATEMÁTICAS HOY, por Jean Dieudonné. Alianza; Madrid, 1989.

Dieudonné es uno de los matemáticos más prolíficos del grupo Bourbaki. En ocasiones ha sido portavoz de ese grupo y, en ocasiones, ha sido "desautorizado" como tal portavoz por otros miembros del mismo. No manteniéndose en el cuadro de trabajador puramente matemático, se ha dado a conocer al gran público por sus intervenciones, a veces muy polémicas, en terrenos como la educación. Su "A bas Euclide!" de 1957 ha quedado como el lema inspirador de la reforma educativa que implantó la "matemática moderna" en los distintos planes de enseñanza, y su posterior fracaso. Desde hace algunos años ha pasado al oficio de historiador de la matemática, llegando a dirigir obras colectivas como el *Abregé d'Histoire des Mathématiques* de 1978. En 1987 publica el libro que ahora paso a comentar.

1. Dieudonné parte de un destinatario de la obra: lector no profesional de la matemática, pero interesado en la ciencia. Desde este punto de partida se plantea una observación: los lectores no científicos han podido seguir la marcha de las ciencias naturales gracias a exposiciones divulgativas que conservan lo esencial de las nuevas ideas; pero esos mismos lectores no pueden seguir los avances, no menos espectaculares, de la matemática. Es una observación muy tradicional que plantea el problema de la posible divulgación científica, no sólo matemática. En lugar de una discusión de esta problemática Dieudonné establece una serie de tesis.

Primera. Existen dos tipos de matemáticas: la clásica, que va desde los griegos hasta Gauss, y la contemporánea, que va desde 1800 hasta nuestros días, aunque sin más explicaciones se adopte el período 1800-1930.

Inmediata, la afirmación "nada de lo que se enseña en los liceos en matemáticas ha sido descubierto después de 1800" (p. 14), y lo mismo puede decirse de las matemáticas que los científicos requieren en sus teorías, matemática que viene a ser la conocida por Maxwell en 1860, salvo en algunos terrenos de la física como la mecánica cuántica.

Y como no se enseña la matemática contemporánea es imposible que el lector pueda seguir cualquier tipo de divulgación salvo que tenga, ya, una formación mínima, como la cursada en los dos primeros años de la uni-

versidad. Pero, y es otra tesis: las matemáticas ni se aprenden por vulgarización ni se dejan vulgarizar.

La razón de que nada de la matemática contemporánea se enseñe y, consecuentemente, sea imposible vulgarizarla o divulgarla se debe, en esencia, al carácter "abstracto" de los objetos y métodos que el matemático ha creado a partir de 1800. Frente a los objetos semiconcretos que manejaba el matemático clásico con su concreción visual figural, con el empleo de "imágenes", el contemporáneo utiliza objetos radicalmente abstractos, imposibles de visualizar.

Implícita, y sin comentarios aclaratorios, la tesis de una contraposición radical entre intuición perceptiva mediante imágenes y la abstracción. Inmediata, otra tesis: los objetos matemáticos son objetos del pensamiento; y una atribución histórica: han sido los griegos los primeros en sostener tal concepción.

Dieudonné se pone como objetivo convencer al lector de que ese grado de abstracción que poseen los objetos de la matemática contemporánea es imprescindible para resolver viejos problemas heredados de la matemática clásica y que ésta era incapaz de resolver. Objetos y métodos abstractos no son, por ello, resultado de la fantasía de los matemáticos ni meras abstracciones carentes de utilidad: se originan en el interior de la matemática y son útiles para resolver problemas matemáticos. En función de este objetivo, pero en función del nivel de abstracción de los objetos y métodos matemáticos –tanto clásicos como contemporáneos–, Dieudonné se contentará con exponer los conceptos más elementales de 3 de los 21 apartados en que divide las teorías matemáticas actuales: temas elementales de álgebra, teoría de números, teoría de conjuntos.

Desarrolla la obra bajo una óptica de carácter histórico: tras dos capítulos de generalidades, breves, se pasa a una panorámica de las matemáticas clásicas desde los griegos hasta Gauss (caps. III y IV). Los dos siguientes y últimos, panorámica de la matemática que va de 1800 a 1930. Los capítulos III y V son los más pretendidamente históricos, mientras que los IV y VI se remiten a algunos problemas que los dos tipos de matemáticas dejan abiertos.

La historicidad manejada por Dieudonné se articula, realmente, al hilo de unos problemas que el autor considera claves. Articulación que le permite llegar, por ejemplo, en la matemática clásica, desde Euclides hasta Hilbert, 1899, al tratar el problema de la geometría euclídea. De manera implícita ha hecho suyo el programa de Hilbert de 1900. En el Segundo Congreso Internacional de Matemáticas de París, Hilbert indicará que la matemática no es más que un proceso de plantear y resolver problemas; al intentar resolverlos, el matemático ha de crear nuevos objetos, nuevos métodos. Dejando claro que si en sus orígenes esos problemas pudieron tener algo que ver con la experiencia sensorial, en cuanto la matemática se desarrolló un mínimo, tales problemas proceden pura y exclusivamente de la propia matemática. Y este planteamiento de Hilbert de 1900 es el que Dieudonné toma como propio.

2. En los dos primeros capítulos expone sus puntos de vista acerca de qué es, cómo y por qué trabaja el matemático. El primer capítulo reproduce, sin más que unas variantes estilísticas, parte de la *Introducción* que redactó para la obra colectiva, ya citada, *Abregé*. En el cap. II defiende la pureza de la matemática. Realmente, es la que permite adoptar por título "Pour l'honneur de l'esprit humain", frase de una carta de C.G.J. Jacobi a Legendre de 1830 en la que el matemático alemán reprochaba a Legendre que los matemáticos franceses de la época se dedicaran a la matemática aplicada y hubieran marginado los trabajos de Abel. Es frase que Dieudonné adopta como lema al frente del libro. Y es frase que todo lector de buena voluntad sabe que Hilbert reiterará en 1926 en defensa del infinito actual matemático frente a tendencias como la de los intuicionistas y otros destructores de la matemática clásica, de la elaborada en el paraíso de Cantor...

Frente a los "dogmas" de la dependencia socio-temporal de la matemática, de la necesidad de su aplicación, del origen físico o científico de sus resultados y sus problemas, Dieudonné opone el carácter "puro", el origen estrictamente interno de los grandes problemas que dan paso a las distintas teorías y métodos. Mantiene, con todo rigor, las ideas de Hilbert de 1900. Consecuente, lo manifestará en la elección, en los capítulos siguientes, de los temas, ejemplos y problemas, de los desarrollos más matemáticos que incluye en los apéndices.

El capítulo III lo dedica Dieudonné a esbozar un panorama de las matemáticas clásicas. Como ideas clave se concentra en las de demostración, axiomática –con lo que alcanza hasta 1899–, aproximación, método de coordenadas de Descartes con el enlace geometría-álgebra y el paso a la noción de función, y la noción de intervalos encajados, origen del concepto de límite.

El capítulo IV se concentra en plantear algunos problemas, de carácter elemental, que se encuentran entre los que han obligado a los matemáticos, para poder realizar nuevos progresos, a inventar nuevos objetos y nuevos métodos (p. 111). Esos problemas los clasifica en dos categorías: Inabordables y estériles, y Prolíficos. Entre los primeros cita los números perfectos, los números de Fermat, el problema de los cuatro colores y algunos geométricos de construcción con regla y compás. Del problema de los cuatro colores y de su demostración realizada en 1977 afirma que "se trata de un resultado aislado que, al igual que su método de demostración, no ha servido por el momento para demostrar otros teoremas 'combinatorios' (p. 116). Afirmación, respecto al método de demostración, inexacta, porque ese método ha permitido establecer la existencia de 26 grupos finitos esporádicos, entre otros temas. De los problemas Prolíficos cita el de la suma de cuadrados como uno de los que ha posibilitado más estudios en teoría de números, así como el enlace con la geometría y el análisis; el de las formas cuadráticas y la búsqueda de propiedades de los números primos, donde en la breve exposición llega a la formulación del teorema de los números primos (p. 130).

El cap. V se abre con la afirmación de que "el decenio 1786-1796 sólo destaca por su falta absoluta de resultados matemáticos de cierta importancia (...) la esterilidad se hizo universal" (p. 147-148). Período de agitación revolucionaria, los matemáticos consideraron agotada la matemática "pura" y, o se dedicaron a las aplicaciones de la matemática, o abandonaron. Y es gracias a Gauss, a partir de 1796, como vuelve a "renacer". Naturalmente, la matemática "pura", no la que manejaban los matemáticos franceses de la época. El renacimiento se debe a la "introducción de nuevos objetos matemáticos, que se distinguen de los objetos clásicos por *carecer de 'imágenes' accesibles a nuestros sentidos* (p. 148). Gracias a esta creación va apareciendo la noción de estructura por la necesidad de abordar algunos problemas heredados de la matemática clásica, insistirá. Noción de estructura, sobre la que se fundamenta la matemática actual, que sólo se precisará en todo su esplendor en el s. XX. Dada la complejidad del tema, el autor, para poner de relieve su tesis, divide el capítulo en apartados según unos temas y problemas.

Nuevos cálculos comprende un breve estudio de los números complejos, los vectores, el cálculo algebraico con

funciones, las permutaciones y sustituciones, desplazamientos y afinidades, congruencias, formas cuadráticas. Es claro que, con sólo el enunciado de los temas elegidos, la tesis de Dieudonné queda asegurada, lo que hace explícito el segundo apartado, *las primeras estructuras*, con la caracterización de grupo y subgrupo que llega desde las permutaciones al grupo "abstracto"; con los cuaterniones y álgebras. Dieudonné indica que todas estas primeras estructuras obligan a la búsqueda de un *lenguaje común* que es el conjuntista establecido por Dedekind –Cantor a mejor gloria...–.

A partir de este momento (pp. 187 ss.) se presentan los conceptos clave de la matemática contemporánea: las estructuras algebraicas, las de orden y las topológicas con los espacios métricos. Inmediato, las nociones de morfismo y los problemas de clasificación. Ello posibilita dar un panorama de las matemáticas contemporáneas, mera indicación de las líneas de trabajo de la matemática actual.

En este punto, Dieudonné cree que ha logrado su objetivo inicial: convencer al lector de que la matemática actual se ha originado por el deseo de resolver los problemas de la clásica. Pero hay una dificultad: aunque a los nuevos objetos, las estructuras, sea imposible atribuirles imagen alguna de nuestro universo sensible, sin embargo los matemáticos afirman que son objeto de la "intuición" matemática. Y el apartado 6 lo dedica Dieudonné a esta problemática. Término difícil, reconoce, el de intuición. Y, tratando de explicarlo, afirma: "Lo que el matemático entiende por intuición es para él una experiencia psicológica totalmente personal, casi incomunicable" (p. 226). Psicologismo subjetivo que hace apoyar en la experiencia, en el trabajo constante con unos temas y que tiene como ayuda el manejo de un lenguaje geométrico que, gracias a sus analogías, posibilita unir campos de trabajo muy diferentes. El psicologismo en el que se adentra Dieudonné hace que el trabajo matemático caiga en auténtico solipsismo.

El cap. VI, final de trayecto, lo va a dedicar a lo que hasta ese momento ha silenciado: que ese desarrollo de 1800 a 1930 no ha sido fácil, sino que ha estado plagado de controversias, de polémicas, de dudas en cuanto a la naturaleza de la propia matemática. Dieudonné vuelve a elegir, para eso es el autor, y olvida todas las discusiones en cuanto a la objetividad de los objetos matemáticos, las polémicas respecto al término "intuición", el rechazo del psicologismo por parte de la mayoría de los matemáticos... y, por supuesto, olvida que el s. XIX se ha calificado como "el siglo de oro" de la geometría, por la creación de la geometría proyectiva.

Se detiene en el Postulado V de Euclides y la aparición de las geometrías métricas no-euclídeas, en la geometría sobre una superficie y, con ello, en la noción de modelo para las geometrías no-euclídeas –no menciona el problema de consistencia relativa que en esta problemática se hallaba incardinado–. Pero es cuestión que se liga a la noción de "verdad matemática" y, a la vez, a la noción de modelo de una teoría física. La verdad matemática queda eliminada en beneficio del concepto de demostración y en cuanto a modelo de teoría física se limita a citar a Poincaré para la imposibilidad de demostrar experimentalmente la existencia de un modelo de espacio en consonancia con la realidad física.

Temas obligados para el lector no profesional, ha de mencionar los conjuntos infinitos con el problema de las paradojas y sus consecuencias como el desarrollo de la lógica matemática. En este punto señalará el total alejamiento entre lógica y matemática, indicando que la primera no tiene utilidad alguna para el matemático actual. Matemático actual del que dice que prácticamente en su totalidad es "formalista" (p. 315), aunque el término lo considere "equivocado". Culmina la obra con la vieja disputa en cuanto al rigor en matemática: El rigor sólo viene dado por la demostración y ésta sólo es factible en el interior de una teoría axiomática en la que los objetos y las relaciones primitivas hayan sido especificadas, así como los axiomas, de manera exhaustiva.

3. La obra de Dieudonné se muestra como una obra de tesis y no de una divulgación que considera imposible. De tesis filosófica, a pesar de que el autor rechace cualquier intento de plantear problemas filosóficos relacionados con la matemática. Para Dieudonné, los pensamientos filosóficos acerca de la matemática son más bien ocultaciones de la misma, terreno donde el consenso no existe, donde sólo caben discusiones perpetuas. Ello no es obstáculo para que, consciente o no, adopte una posición filosófica que enuncia, sin más, mediante la serie de tesis que he explicitado en la primera parte de esta crítica. Y esta posición filosófica no es otra que la de un pretendido constructivismo conceptualista: es el matemático el creador de objetos y métodos, independientemente de la intuición "sensible", de la imagen, de cualquier referencia que no sea el propio pensamiento matemático. En filosofía de la matemática hay, de hecho, otras posiciones; en particular, la del realista que cree que esos objetos son ideas que el matemático capta como elementos de un mundo eidético que le trasciende, o reconstruye como propiedades que se dan en la naturaleza. Y las distintas posiciones surgen no de meras especulaciones, sino de la praxis matemática. Praxis que lleva a plantear una serie de cuestiones de carácter "filosófico", le pese o no a Dieudonné. El considerarlas "pseudo-problemas" le conduce a incoherencias radicales. Me limitaré a señalar algunas.

Al idealismo adoptado por el matemático francés se le plantea como gran problema justificar la construcción de objetos del pensamiento con infinitos elementos dados en acto. Dieudonné esconde el problema y se refugia en un psicologismo apoyado en la intuición personal del matemático, lo que, conduce a un solipsismo radical. Como intento de salida, ese idealismo se conjuga con la axiomatización formal, es decir, con la apoyatura en el signo finito que permite suprimir las cuestiones acerca de la verdad matemática. Se afirma que se construyen objetos y se realizan proposiciones acerca de esos objetos; pero también se afirma que tales proposiciones carecen del predicado veritativo. Y ello indica con nitidez que esos objetos dejan de ser tales, carecen de denotación o referencial; por lo que son meras formulaciones sígnicas que se combinan en configuraciones sintácticas calificadas de "demostraciones". Consecuencias inmediatas serían, por un lado, por qué mantener la terminología de objeto y, por otro, por qué elegir unas configuraciones y no otras. Acudir a problemas internos no resueltos de la matemática no resuelve la cuestión salvo petición de principio, porque desde el momento inicial se ha delimitado esa interioridad y se ha negado cualquier influencia semántica, cualquier influjo externo. Sólo queda como solución la estricta arbitrariedad.

He indicado el solipsismo al que se ve conducido Dieudonné desde su pretendido constructivismo psicologista. Constructivismo que, por otro lado, se me muestra como una trampa lingüística en la que el autor cae y, en su confusión, pretende hacer caer al lector de buena voluntad. Hablar de construcciones con infinitos actuales es una manera lingüística de encubrir lo imposible.

Igualmente habría que señalar los equívocos entre "intuición" y "abstracción" que toma como contrapo-

sición entre la matemática clásica y la contemporánea y clave para la imposible vulgarización y divulgación de este tipo de matemática. Contraposición que termina eliminándose cuando afirma que la matemática contemporánea también se apoya en una "intuición". En ningún lugar indica en qué se diferencian, salvo insistir en el hecho de que la intuición "clásica" se apoya en la "imagen", en la figura –la contemporánea, en la psicología de cada matemático por lo que, por incomunicable, nadie sabe en qué se apoya–. Sin entrar en más detalles de las incoherencias que muestra en este campo, ¿qué ocurre con los números? ¿Se apoyan también en la figura? Esta parece que debería ser el numeral y, si esto se aceptara, se caería en un simple inscripcionismo figural insostenible: "2=3" porque las cifras tienen el mismo tamaño...

La abstracción en la que insiste, como criterio demarcador de la matemática contemporánea, carece de tal entidad demarcadora: en primer lugar, porque hay abstracciones que carecen de valor y no se indica criterio para tal afirmación; en segundo lugar, decir que la matemática contemporánea es la que maneja objetos abstractos es mera retórica: cualquier disciplina teórica maneja conceptos abstractos y objetos abstractos de segundo nivel. Si se indica que ese objeto matemático es la estructura y que las teorías matemáticas actuales se distinguen por las combinaciones que se realizan entre las distintas estructuras, esto tampoco es criterio demarcador, porque lo mismo puede decirse para otras disciplinas, desde la lingüística hasta la epistemología genética de Piaget.

He señalado, también, el especial matiz del término "historia". Dieudonné lo emplea de modo particular, ligado a la elección de unos problemas o temas. De aquí que las fronteras cronológicas que señala no sean coherentes, ni muy de acuerdo con las cronologías históricas. Además, este empleo hace que coexistan las matemáticas clásica y contemporánea. Pero si coexisten, ¿cuáles son sus relaciones? ¿Por qué ese intento de suprimir una en beneficio exclusivo de la otra?

Al mencionar el problema de los cuatro colores he indicado una afirmación inexacta de Dieudonné: el método de demostración utilizado en 1977 carece de utilidad. Es un tema ampliamente debatido en el momento actual: el concepto de demostración mediante programas de ordenador. Tema que conduce a cuestionar tanto la concepción sintáctica de demostración como la propia naturaleza de número. Que el matemático francés "ignore" el tema no implica que no esté ahí. Ignorancia justificable, una vez más, por la animadversión explícita a todo lo que no sea matemática "pura": las demostraciones con ordenador exigen, además de matemáticos, programadores, informáticos, un ordenador.

Son cuestiones en las que Dieudonné no entra. Convencido de su posición, pretende convencer al lector de que esa es la buena vía, y pretende hacerlo mediante una exposición radicalmente unilateral. Ello le conduce a adoptar un estilo dogmático ante el cual el lector o lo toma o lo deja. Pero a mí me lleva a otro terreno, esta vez un campo en el que, al igual que el filosófico, Dieudonné no quiere entrar: el temporal sociológico. Y no quiere entrar porque, desde él, su propia obra y la del grupo Bourbaki también quedarían subsumidas bajo uno de los dogmas que él rechaza, la temporalidad del matemático y de los problemas que se le plantean.

En el tono dogmático utilizado hay una permanente insistencia en la "pureza" de la matemática, en su inutilidad absoluta salvo para ella misma. Es claro que, con esta insistencia, logra como objetivo llegar a la conclusión de que una disciplina autosuficiente, difícil e inútil es gratuita y, por tanto, puede ser suprimida. A pesar de que Dieudonné hace llegar a esta conclusión, gracias a su estilo, parece que querría sostener la conclusión contraria: porque es inútil, porque es gratuita, porque es difícil y exige trabajo y esfuerzo, es la disciplina más noble y la que hay que potenciar; su auténtica finalidad es la de rendir honor al espíritu humano.

Esta finalidad era la expresada por Jacobi y la que da título a este libro. Pero Jacobi la hizo en momentos en que la matemática se estaba viendo acosada y había que defenderla. Ello suponía, en 1830, la creación de cátedras y puestos universitarios para algunas disciplinas matemáticas que, por no haber sido creadas, llevaron a la miseria y muerte a matemáticos como Abel y Galois. Creación de puestos universitarios y no sólo "politécnicos" o de ingeniería que no estaría muy en consonancia con la radical "pureza" del trabajador matemático.

En el momento actual también hay cierto acoso a la ciencia y, más radical, a la matemática que se ve como base de la primera. En primer lugar, se la hace responsable del desarrollo técnico y de la pérdida de la condición humana que ello entraña. En segundo lugar, los avances de la informática y la computabilidad conducen a que el matemático se vea como un mero proveedor de algoritmos, de procesos de cálculo. En tercer lugar, muchos matemáticos se han pasado del "formalismo" que les atribuye Dieudonné al manejo de una matemática "combinatoria". En cuarto lugar, y aquí el matemático francés es, en parte, corresponsable, "Juanito no sabe sumar" y, sin embargo, la matemática se ha convertido en "la" causa del fracaso escolar, precisamente la "matemática moderna" por la que él aboga.

Esta sensación de acoso a la matemática "formal" la ha vivido Dieudonné en distintas reuniones internacionales. Y no es el único. En 1986, en un congreso para conmemorar el cincuentenario del Programa de Hilbert, Simpson pedía a los matemáticos que acudieran "en defensa de" la matemática. Y no sólo por los ataques procedentes de los no matemáticos y de una sociedad cada día más tecnologizada, sino por los surgidos de entre los propios matemáticos. Y es en esta línea en la que cabría inscribir la obra de Dieudonné: desde el título, hasta los continuos rechazos de la utilidad, los ensalces a un elitismo propio del trabajador matemático, su enemiga a cualquier imposición de dogmas y la consiguiente libertad del matemático en su trabajo... (J. L.)

THE CONODONTA. MORPHOLOGY, TAXONOMY, PALEOECOLOGY AND EVOLUTIONARY HISTORY OF A LONG-EXTINCT ANIMAL PHYLUM, por Walter C. Sweet. Oxford University Press, 1988.

De unos años a esta parte, en la literatura paleontológica se habla mucho de los conodontos. Estos microfósiles han llamado la atención de los biólogos, ya que representan estructuras de organismos enigmáticos extinguidos, cuyo significado no se ha resuelto todavía, y de los geólogos, por su valor como herramientas de datación en terrenos del Paleozoico y Triásico. Los conodontos se obtienen mediante un tratamiento previo de las rocas, por disolución de las mismas en ácidos débiles, con lo cual la mayoría de estos microfósiles se conocen como piezas separadas, que originalmente formaban parte de conjuntos más complejos, integrados por elementos diferentes. Desde su descubrimiento, en 1856, se han realizado notables progresos en el estudio del grupo.

El interés de los conodontos crece incesantemente y son numerosas las investigaciones sobre los mismos, lo que determina un ritmo de casi una

publicación al día sobre el tema. El libro *The Conodonta* representa una interesante síntesis del estado actual del conocimiento del grupo, que facilita a los no especialistas una visión comprensible de estos fascinantes organismos que tanta importancia han alcanzado en los últimos años y, desde luego, es de obligada lectura para los especialistas que encontrarán en la obra aspectos muy sugerentes.

El autor, Walter C. Sweet, de la Universidad estatal de Ohio, es una autoridad en este tema, que desde 1976 a 1985 presidió la Pander Society, grupo internacional de investigación de conodontos, reconocido por la Asociación Paleontológica Internacional.

El hecho de que los conodontos representen piezas disgregadas pertenecientes a conjuntos esqueléticos dificulta su ordenación desde el punto de vista anatómico. El conocimiento de la morfología de estas piezas es esencial, no sólo para determinar su forma y características, sino también para elaborar mejor el sistema organizativo de los conjuntos o "aparatos" de los cuales formaban parte. En esta obra, el autor sintetiza una clasificación de la forma de los conodontos en 22 categorías (tradicionalmente se distinguían 4), muchas establecidas por él mismo en trabajos anteriores. Además, propone una descripción y terminología de los tipos de aparatos en los cuales se integran las piezas conodontales.

El núcleo fundamental de la obra lo constituye la propuesta de una clasificación muy elaborada del grupo, basada en conjuntos de elementos (taxonomía multielemental), llegando al establecimiento de filogenias o líneas de parentesco. Este es un campo muy arriesgado, ya que muchos conjuntos de elementos son deducidos empíricamente a partir de piezas aisladas, no pudiéndose, en muchos casos, proponer filogenias bien fundamentadas. Pero representa un precedente importante en la clasificación de los conodontos y, sin duda, será una obra estudiada y controvertida.

El libro se complementa con comentarios sobre la interpretación de restos de organismos fósiles, con tejido blando conservado, descubiertos recientemente, y sus relaciones con otros grupos de animales; se examinan también las ideas sobre el desarrollo y procesos evolutivos de los conodontos, análisis de modelos ecológicos y síntesis generales sobre la paleoecología del grupo.

Llamará la atención de los no especialistas la rara paradoja de los conodontos, como grupo de fósiles que palentólogos y estratígrafos utilizan en la resolución de problemas bioestratigráficos, cuando se desconocen aún sus afinidades biológicas. Este hecho se da con frecuencia en paleontología, lo que demuestra el carácter pragmático de la labor del profesional, que utiliza con éxito un material del cual ignora, con frecuencia, su situación en el panorama de la vida. (S.G.-L.)

THE EVOLUTION AND THE CLASSIFICATION OF FLOWERING PLANTS, por Arthur Cronquist. The New York Botanical Garden; Nueva York, 1988.

Este libro, en su segunda edición, es una síntesis muy personal del autor sobre el origen, evolución y clasificación de las plantas con flores. En él ofrece una visión coherente y elaborada de temas actualmente controvertidos. No se detiene, empero, en examinar opiniones ajenas: "For other points of view, read other authors".

La introducción va seguida de siete capítulos, una clasificación sintética de las Magnoliófitas, un glosario, un índice y una tabla de tiempos geológicos sin paginar. Del capítulo primero al quinto explica las bases de la moderna taxonomía y la concepción filosófica subyacente. Traza los grandes rasgos de la morfología, anatomía, embriología, palinología, citología y química; en menor proporción, pasa revista a la ecología, geografía y paleontología. Dedica el capítulo sexto y el séptimo a la clasificación en subclases, órdenes y familias de mono y dicotiledóneas.

Al ocuparse de la naturaleza de la taxonomía nos expone su carácter jerárquico, los principios básicos de clasificación y la importancia de que los sistemas clasificatorios se funden en la evolución y posean valor predictivo. A la hora de valorar los caracteres, indica cómo se opera *a posteriori*, recordando que la experiencia demuestra que no todos poseen el mismo valor taxonómico y que caracteres similares reciben una valoración distinta según el grupo de plantas de que estemos hablando. Una mala clasificación, opina, es mejor que ninguna; en el fondo, dice, los botánicos no hacen más que reformar las clasificaciones de las generaciones precedentes. Destacaría, entre los otros varios puntos que aborda, su comparación entre nicho zoológico y nicho botánico, pues resalta con acierto la labilidad del segundo.

Replantea el principio, hasta ahora axiomático, de que todo grupo taxonómico tiene un origen monofilético. Grupos actualmente distintos tienen, por contra, una base evolutiva común que se ha ido dividiendo aleatoriamente. Y cada vez tenemos más pruebas de que los grupos que proceden de un antepasado común, éste ha quedado excluido del grupo y atribuido a otro diferente. En esta misma línea de razonamiento defiende que el origen probable de las angiospermas no arranca de un antepasado común de las gimnospermas.

Cronquist estudia el cladismo y su pretensión fundamental de conferir la máxima objetividad a la representación evolutiva de los grupos. Pone en evidencia los puntos débiles de esta teoría, no exenta, afirma, de los prejuicios subjetivistas que denosta. Sus simpatías van dirigidas hacia una combinación de cladismo y taxonomía numérica.

Tras describir qué entiende por especies, por grupos infraespecíficos y por especiación, se entretiene pormenorizadamente en el origen de las angiospermas, con especial atención en el estudio del polen. Cifra en las Caytonales el origen más probable y apuesta por la neotenia. El foco primario se hallaría en Gondwana, en la placa australiana.

Analiza *in extenso* los rasgos evolutivos de los distintos caracteres de las angiospermas, aunque se queda quizá corto en determinados aspectos. En lo relativo a las angiospermas primitivas, por ejemplo, se han postulado hipótesis interesantes sobre la evolución de esas formas, en la región macaronésica y mediterránea, que Cronquist no cita; queda la duda de si el autor discrepa de las mismas o desconoce la bibliografía. Y también se encuentra a faltar una lectura ecológica de los caracteres morfológicos.

Los dos últimos capítulos de la obra compendian lo que ya escribiera en 1981 en su libro *An integrated system of classification of flowering plants*. Acepta seis subclases, 64 órdenes y 321 familias de Magnoliópsidas, y cinco subclases, 19 órdenes y 65 familias de Liliópsidas. Convendría saber que otros autores contemporáneos admiten un número mayor de familias y órdenes; por ejemplo, A. Takhjatan o Dalhgren.

A modo de resumen, diría que nos hallamos ante una exposición personal, clara y lúcida sobre la especiación, el origen de las angiospermas y clasificación razonada de las mismas. Constituye también una compilación y una elaboración sintética de abundancia de datos. Una obra, pues, de consulta obligada por parte de profesores y alumnos de botánica, que bien pudiera servir de libro de texto. (A. R.)

Apuntes

No podemos atribuir únicamente a la atracción ejercida por el Sol y los planetas los movimientos orbitales de los cometas de período corto. Tienden esos objetos celestes a volver a los perihelios con cierto retraso o anticipación sobre lo previsto por las ecuaciones gravitatorias. ¿A qué se deben esas fuerzas? Su conocimiento facilitaría predecir el curso futuro de los cometas. Los astrónomos acaban de iniciar una vía indirecta de aproximación: medir su tasa de producción de gas, gracias a lo cual han obtenido ya que la morfología de las curvas de producción se ajusta bastante bien con esos adelantos y retrasos.

Los paleontólogos han encontrado una mina en unos lechos especiales y, diríase, inesperados: los anaqueles de los museos. Está de moda reinterpretar los fósiles hallados y descritos por otros. Así ocurre con *Tetracerops insignis*, a quien Romer, uno de los históricos de la disciplina, consideró pelicosaurio. A tenor de la revisión, ese tetrápodo cornudo sería terápsido, descendiente de pelicosaurio. Más aún, constituiría el eslabón perdido entre los sinápsidos del Pérmico inferior y el superior.

Otro eslabón. El que engarzaría las algas verdes con las plantas terrestres. Posee el ADN de los cloroplastos de las segundas ciertos intrones de ARN de transferencia entre otras características distintivas. No los presentan las eubacterias, ni las algas, salvo las Caroficeas. Se logra precisar, así, incluso la fecha de la colonización terrestre: hace unos 400-500 millones de años.

Cuando una hipótesis se muestra remisa a corroborarse, los científicos comienzan a ponerla en cuestión. En 1965 se avanzó la hipótesis de la relación entre tamaño corporal y rendimiento energético, a tenor de la cual la talla sería uno de los principales determinantes de la concentración relativa de los animales planctónicos. Por una doble razón: las especies de cuerpo grande quedarían expuestas a los ojos de los peces depredadores y ocuparían un rango privilegiado en la lucha por los recursos, al ser capaces de vivir en bajas concentraciones de éstos. La primera razón se había comprobado en múltiples ocasiones; la segunda, cuando estaba a punto de desecharse, acaba de recibir una sólida confirmación con los cladóceros, y, con ella, la hipótesis de la relación tamaño-rendimiento.

Del conocimiento científico se resalta su carácter objetivo. Pero éste es a veces un deseo más que una realidad. Fijémonos en el dominio de la cristalografía, sin el que no se explica el progreso en múltiples frentes, en particular el de la bioquímica. Es dogma en ésta que la función sigue a la estructura, y es esperanza general que la manipulación en la estructura de las macromoléculas permitirá robustecer la eficacia de los fármacos en su misión terapéutica. Pero lo que resultaba verdad incontrovertida —la cristalografía de rayos X revela la estructura con toda nitidez— comienza a tambalearse. La ferrodoxina y varias enzimas, entre otras proteínas, no poseen la morfología aceptada. Empiezan a aconsejarse análisis más finos y mejores perfiles de los prototipos antes de lanzar las campanas al vuelo.

Los químicos hablan de átomos y moléculas como quien habla de objetos de uso diario; diríase, tal como se explican, que los están viendo y que son capaces de seguir su celerísimo movimiento. La física de superficies, auxiliada con la espectroscopía de ionización de campo, les da pie para lo primero; en lo relativo a su movimiento, capital con la energía para las reacciones, la espectroscopía de láser ha venido en su socorro. En efecto, las vibraciones y las rotaciones ultrarrápidas son los movimientos fundamentales que caracterizan el enlace químico y la dinámica molecular de las reacciones. Gracias a esa técnica lasérica, los químicos ''ven'' los movimientos de sistemas aislados conforme se van produciendo. Para ello, deben excitar el sistema (en el caso de las vibraciones) y alinearlo (en la rotación) en una escala temporal más corta que el período de las vibraciones, cifrado en 10^{-13} segundos, y el de la rotación, de 10^{-10} segundos.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



RU 486, por André Ulmann, Georges Teutsch y Daniel Philibert
Esta droga controvertida se utiliza en Francia para poner fin a embarazos no deseados. No era esa, sin embargo, la finalidad del compuesto que ofrece otras muchas aplicaciones.

PLUTON, por Richard Binzel
El noveno planeta posee un satélite enorme, una superficie cubierta de metano congelado y una tenue atmósfera que cae periódicamente en forma de nieve. Tal vez nos hallamos ante una reliquia de la formación del sistema solar.

BIOSONAR Y COMPUTACION NEURAL EN MURCIELAGOS, por Nobuo Suga
Gracias al biosonar, los murciélagos reciben una información precisa de cuanto ocurre a su alrededor. Están implicadas neuronas muy especializadas del sistema auditivo.

LA DORSAL CENTRO-OCEANICA, por Kenneth C. Macdonald y Paul J. Fox
Es la cadena montañosa más larga, el área volcánica más activa y, hasta hace poco, la región menos accesible de la Tierra. Su cartografía nos muestra la formación y desarrollo de segmentos de la misma.

PECES RANA, por Theodore W. Pietsch y David B. Groebecker
Maestros del mimetismo agresivo, estos carnívoros voraces pueden tragar sus presas antes que cualquier otro vertebrado depredador.

HELIO-3 SUPERFLUIDO, por Olli V. Lounasmaa y George Pickett
Las propiedades de este líquido a una temperatura del milikelvin revelan la acción, a escala macroscópica, de la mecánica cuántica. A temperaturas del nanokelvin pueden existir líquidos todavía más extraños.

PROPIEDADES DE LOS MICROAGREGADOS METALICOS, por M. Pilar Iñiguez y Julio A. Alonso
Pequeños agregados formados por unas decenas o escasos cientos de átomos de elementos metálicos presentan propiedades que difieren bastante del metal macroscópico.

OLIVER HEAVISIDE, por Paul J. Nahin
Un eminente físico-matemático victoriano que desdeñó el rigor matemático, un tímido que ridiculizó sin piedad a sus enemigos; también puso los fundamentos de la ingeniería de circuitos eléctricos.

